Ictiofauna y desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca del río Magdalena-Cauca, Colombia

Luz Fernanda Jiménez-Segura, Daniel Restrepo-Santamaría, Silvia López-Casas, Juliana Delgado, Mauricio Valderrama, Jonathan Álvarez y Daniel Gómez

Resumen

La cuenca del río Magdalena-Cauca presenta 213 especies de peces, de las cuales un poco más del 50 % son endémicas. Esta cuenca concentra el 80 % de la población colombiana, sostiene el 80% del PIB nacional y en sus cauces se localiza el 84 % de las centrales hidroeléctricas que surten de energía al país. La presencia de los Andes genera gradientes altitudinales en los sistemas acuáticos así como en la biota asociada a lo largo de la cuenca Magdalena-Cauca. Para analizar la interacción entre el gradiente altitudinal en la distribución de especies de peces dulceacuícolas y la localización de los embalses actuales, se hizo un análisis de la distribución altitudinal de las especies peces endémicas y migratorias, y se discutieron las implicaciones para su conservación respecto al estado actual y futuro en la formación de embalses, basados en la revisión de estudios de caso a nivel global y nacional. Se encontró que el número de especies es inversamente proporcional a la altitud, mientras que los endemismos son directamente proporcionales y que la localización de embalses abajo de los 700 m de altitud influirá en el estado de conservación de las especies migratorias. Se evidencia que un embalse crea nuevos gradientes de riqueza y modifica los cauces que son utilizados por especies migratorias como áreas de desove. Se concluye que el desarrollo del sector eléctrico basado en el uso del agua de los ríos andinos, así como otras actividades asociadas con el desarrollo económico de la sociedad colombiana, ha generado cambios en los sistemas acuáticos dulceacuícolas en la cuenca Magdalena-Cauca, e influye en la estructura de los ensamblajes de especies de peces y en la dinámica migración-reproducción de las especies de peces importantes para la pesca artesanal.

Palabras clave. Embalses. Represas. Peces dulceacuícolas. Andes.

Abstract

The Magdalena-Cauca River basin has 213 species of freshwater fish, of which slightly more than 50% are endemic. This basin accounts for 80% of the Colombian population, holds 80% of the national GDP and within its channels are located the 84% of the hydroelectric plants that supply energy to Colombia. The Andean mountains generate altitudinal gradients in aquatic systems as well as its associated biota along the Magdalena-Cauca basin. To analyze the interaction between the altitudinal gradient in the distribution of species of freshwater fish and the location of existing reservoirs, it was performed an analysis of the altitudinal distribution of endemic and migratory fish species and their implications for their conservation based on the current and future state in the formation of reservoirs, using a review of case studies at global and national levels. It was found that the number of species is inversely proportional to altitude, while the endemics are directly proportional and reservoirs below 700 m altitude affect the conservation status of migratory species. A reservoir creates new species richness gradients and modifies the channels that are used by migratory species as spawning areas. We conclude that the development of the hydropower based on the use of water in the Andean rivers and another activities associated with economic development of Colombian society, has led to changes in freshwater aquatic systems in the Magdalena-Cauca basin, influences in the structure of the assemblages of species of fish and in the dynamic of migration and spawning of freshwater fish species important for artisanal fisheries.

Key words. Reservoirs. Dams. Freshwater fish. Andean mountains.

Introducción

La ictiofauna dulceacuícola en Colombia está conformada por 1435 especies (Maldonado-Ocampo *et al.* 2008). Aunque la cuenca del río Magdalena-Cauca no es la más rica en especies (213 especies), su porcentaje de endemismo es alto con un poco más del 50 % de sus especies restringidas a esta cuenca (Abell *et al.* 2008, Albert *et al.* 2011). El desarrollo económico en la cuenca y la concentración del 80 % de la población humana en esta cuenca ha llevado a que la conservación de su ictiofauna esté amenazada (Galvis y Mojica 2007) y entre estas amenazas se incluye la formación de embalses dentro de los cauces de los ríos para la generación de energía hidroeléctrica.

El control de las aguas de los ríos es una práctica antigua dentro de la cultura humana. La finalidad más común es la de mantener agua para controlar crecientes, proveer acueductos y sistemas de riego. En 1880 el descubrimiento de la transformación de la energía cinética liberada por las caídas de agua en energía eléctrica mediante su paso por unas turbinas acopladas a un generador, permitió que estos reservorios de agua fueran también considerados para generar energía eléctrica. El crecimiento de la población humana, así como la economía de los países, requieren del uso de la energía eléctrica y es por ello que el Producto Interno Bruto PIB de las naciones se asocia fuertemente con la oferta de éste tipo de energía, a tal punto que el PIB depende de la capacidad de los Estados de proveerla a su población y a sus industrias.

La formación de un embalse dentro del cauce de un río conlleva múltiples cambios en el sistema acuático (Margalef 1983). Petts (1980) define que estos efectos pueden ser considerados como respuestas jerárquicas. Los efectos de primer orden se relacionan con el desvío del río, con el comienzo del llenado del embalse, con la alteración en la transferencia de energía que viene de la cuenca afluente y con el cambio en la tipología del régimen de caudal aguas abajo. Los de segundo orden (en una escala mayor de tiempo), se relacionan con el cambio en la geomorfología del cauce y en la influencia que tiene el río sobre su plano lateral aguas abajo de la presa. Y los de tercer orden, aquellos que se dan sobre la biota acuática como resultado de la interacción de las dos primeras categoría de efectos.

A pesar de que lo estudios sobre las características de estos efectos y sus implicaciones en la dinámica de los sistemas acuáticos, así como de su biota asociada han sido tema de múltiples investigaciones y publicaciones a nivel global (Avakyan y lakovleva 1998, Finer y Jenkins 2012, Liermann *et al.* 2012), el análisis en sistemas tropicales y de montaña representa un desafío para el estudio de la respuesta de la biota acuática a la modificación impuesta por los embalses. Los ríos andinos presentan cauces continuos entre altitudes que van desde los 5 m hasta arriba de los 3500 m, generando gradientes ambientales asociados con la pendiente longitudinal y lateral del cauce, la temperatura y velocidad del agua (Jaramillo-Villa *et al.* 2010). Esta es tal vez una de las principales causas del elevado endemismo de sus especies: la variedad de sistemas acuáticos y el tiempo de aislamiento de la región oriental suramericana (Rodríguez-Olarte *et al.* 2013).

Colombia es uno de los países andinos con mayor potencial para el desarrollo de la energía hidroeléctrica (Ledec y Quintero 2003) y el Estado Colombiano planea duplicarla en los próximos 15 años (UPME 2014), teniendo como principal eje de desarrollo la zona Andina de la cuenca Magdalena-Cauca. Al año 2013, la capacidad instalada en el país para la generación de energía eléctrica es de 14478 MW; 64 % proviene de centrales hidroeléctricas, 31 % de termoeléctricas y el 5 % de otras fuentes (p. e. eólica) (UPME 2013). Colombia cuenta con embalses que poseen capacidades de almacenamiento superiores a 15 Mm^3; de éstos el 54 % se destinan para generación de energía. A partir de la década de los años 70, la construcción de embalses se promovió en cauces abajo de los 1000 m de altitud (Figura 1). Estos embalses tienen un área superficial cercana a 325 km^2, un volumen de agua embalsado de 11518 Mm^3 y una producción de energía eléctrica efectiva de 8392 MW, de la cual cerca del 90 % es producida por veinte centrales hidroeléctricas, y de éstas el 84 % se encuentran dentro de la cuenca del río Magdalena-Cauca (Figura 2).

Con el fin de analizar el efecto de la formación de los embalses a lo largo del gradiente altitudinal en la cuenca

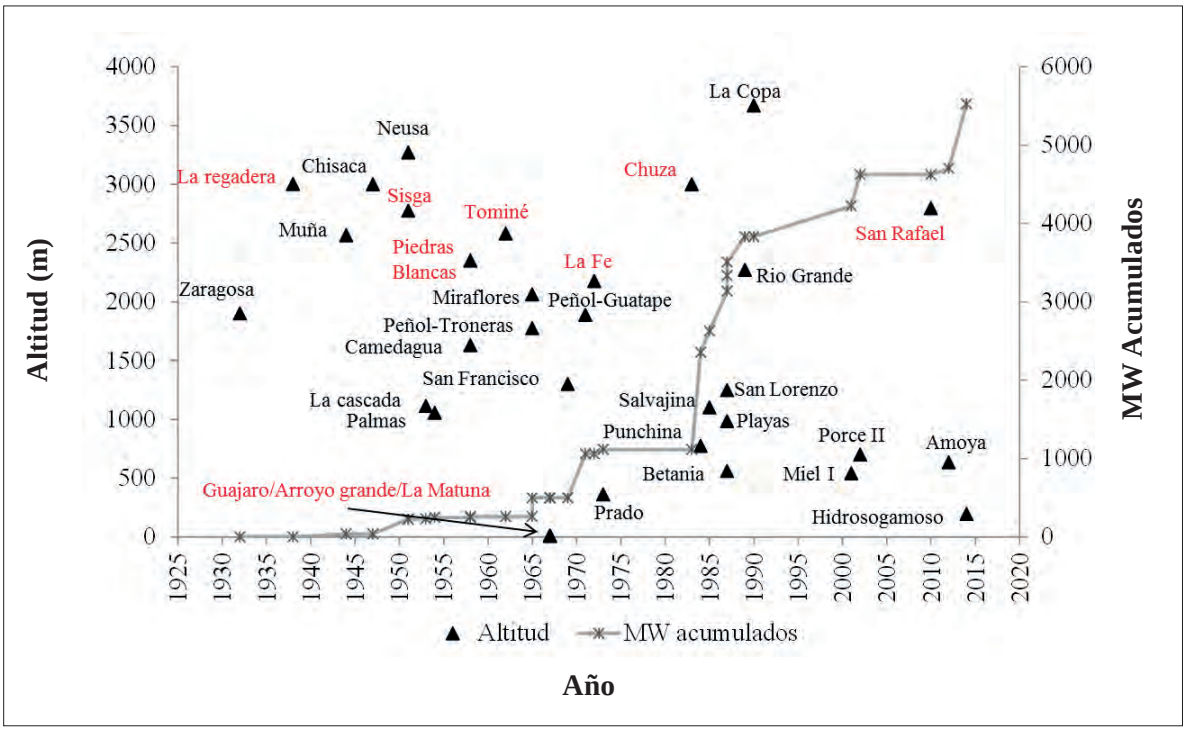

Figura 1. Cronología de la formación de embalses de acuerdo con su altitud (m) y la capacidad acumulada de generación (MW). En letras rojas, embalses que no generan energía.

del río Magdalena-Cauca y la respuesta de la ictiofauna a la modificación de éste sistema acuático Andino se hizo una revisión de estudios de caso a nivel global sobre los cambios que los embalses generan sobre la ictiofauna dulceacuícola, se analizó la distribución altitudinal de las especies de peces y la posición de los embalses en la cuenca del río Magdalena-Cauca. A partir de allí se discuten las implicaciones que el desarrollo del sector hidroeléctrico tiene sobre la conservación de la ictiofauna presente en esta cuenca.

Material y métodos

El análisis de la influencia del desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca del río Magdalena-Cauca sobre la ictiofauna se basó en la distribución altitudinal de las especies y la ubicación de los embalses actuales y planeados. Dado que la distribución de las especies dulceacuícolas de la cuenca del río Magdalena-Cauca está fuertemente influenciada por la altitud y sus variables asociadas (Jaramillo-Villa *et al.* 2010), se utilizó la información de bases de datos publicadas sobre la composición de especies de peces, su distribución altitudinal y su presencia en los embalses (Maldonado *et al*. 2008, Jiménez-Segura *et al.* 2010, Jiménez-Segura *et al.* 2013). La información sobre los embalses actuales y planeados al año 2027 (pe. altitud, coordenadas geográficas) fue obtenida de los informes de la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), reportes técnicos encontrados en las páginas de internet de las empresas generadoras de energía, base de datos de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y bases de datos de las Corporaciones Autónomas regionales.

Utilizando la distribución del número de especies de peces por clase de altitud (amplitud de 100 m), se definió dentro de cada sector del cauce modificado, el número de especies de peces totales esperadas, y con base en estas, se estimó el número de especies migratorias según lo reportado en Usma *et al.* (2013) y el número de especies endémicas basados en la distribución geográfica presentada en Eschmeyer y Fong (2014).

Figura 2. Localización geográfica de los embalses utilizados para generación de energía eléctrica en Colombia. Triángulos (capacidad de generación mayor a 100 MW), círculos (capacidad de generación menor a 100 MW); negro (embalses construidos), verde (embalses en estudio), amarillo (embalses en construcción).

Para definir las afectaciones que el uso del agua para generar energía eléctrica ha generado en la ictiofauna dulceacuícola a nivel global, se realizó una búsqueda de estudios de caso sobre el tema que estuvieran disponibles en internet. En total fueron revisados 300 documentos (86 % publicados en revistas científicas, 4 % reportes técnicos, 4 % capítulos de libros y 6 % tesis) provenientes de áreas geográficas en diferentes latitudes (55 % de zona intertropical, 33 % latitud norte, 13 % latitud sur) producidos entre los años 1975 y 2013. Los efectos reportados en los peces dulceacuícolas por la literatura revisada fueron agrupados en impactos. La frecuencia de ocurrencia de cada impacto fue estimada como el número de veces en que se reporta el impacto *i* respecto al número de casos a nivel global, y en cada una de las franjas latitudinales (latitud Norte, Latitud Sur, Trópico).

Resultados

Distribución altitudinal de la ictiofauna

El número de especies de peces en la cuenca del río Magdalena-Cauca cambia lo largo del gradiente altitudinal, los ensamblajes con mayor número de especies se encuentran en las menores altitudes. Sin embargo, a pesar de que el número de especies se reduce a medida que se incrementa la altura, el porcentaje de endemismos es directamente proporcional a la altitud (Figura 3).

Aunque el número de especies del ensamblaje es inverso a la altitud, este patrón presenta una disrupción, con un incremento a ciertas altitudes. En los ecosistemas acuáticos del río Magdalena que se encuentran entre los 5 y 100 m de altitud (p. e. ciénagas o lagos dentro del plano de inundación), se reportan hasta 62 especies; entre los 100 y los 300 m el número de especies puede llegar a 92, y arriba de los 2300 m los ensamblajes pueden estar conformadas por entre tres y seis especies. Entre los 5 y los 100 m de altitud, las ciénagas o lagos del plano inundable del río Magdalena y el Cauca, son hábitat deonde especies como *Cyphocharax magdalenae*, *Pimelodus blochii*, *Prochilodus magdalenae*, *Hoplosternum magdalenae* y *Astyanax magdalenae*, son dominantes en el sistema. A medida que aumenta la altitud, en los ríos andinos el ensamblaje está conformado por cerca de 100 especies donde especies como *Chaetostoma* spp., *Andinoacara latifrons*, *Astyanax spp* y *Creagrutus magdalenae*, son representativas de este gradiente. Entre los 200 y 700 m, los géneros *Astroblepus*, *Trychomycterus*, *Lebiasina* y especies como *Brycon henni* caracterizan la ictiofauna, y se presentan entre 50 y 92 especies. En sistemas de corrientes de montaña entre los 1000 y los 1800 m de altitud, pueden encontrarse entre 20 y 30 especies, donde carácidos como *B. henni* y *Creagrutus* spp., y especies de los géneros *Astroblepus* y *Trychomycterus* son característicos. Arriba de los 1800 m el ensamblaje es pobre en especies y está representado por *Eremophilus mutissi*, especies del género *Grundulus* y *Lebiasina narinensis*.

El 15 % de las especies de la cuenca del río Magdalena-Cauca tienen un comportamiento migratorio. La altura mayor a la que se reportan ejemplares de individuos de especies migratorias como *Prochilodus magdalenae*, *Salminus affinis*, *Brycon moorei* e *Icthyoelephas longirostris* son los 1500 m; aunque especies como la sabaleta *Brycon henni* pueden alcanzar los 2000 m. Dentro del grupo de los bagres (Familia Pimelodidae) especies del género *Pimelodus* como *P. grosskopfii,* pueden alcanzar los 900 m mientras que ejemplares de especies como *Pseudoplatystoma magdaleniatum* y *Sorubim cuspicaudus* no sobrepasan altitudes mayores a los 500 m.

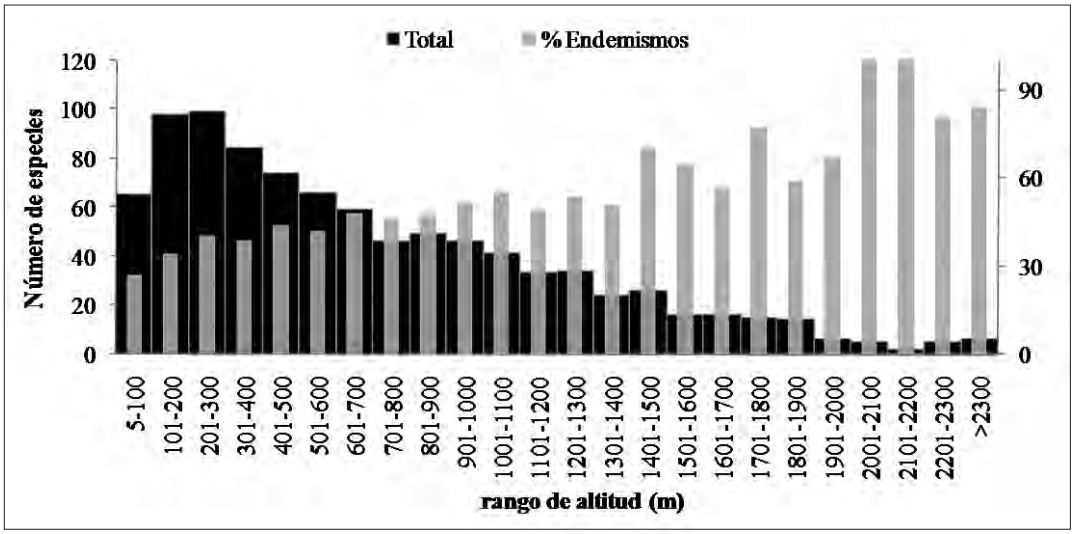

Figura 3. Distribución altitudinal del número de especies de peces y del porcentaje de endemismos. Tomada y modificada de Jiménez-Segura *et al.* (2013)

La ictiofauna dulceacuícola y los embalses: revisión de estudios de caso

El 50 % de los estudios de caso encontrados en internet fueron de la región neotropical. Dentro de ésta, el mayor número de trabajos provienen de Brasil y Colombia (Figura 4). Dentro de la región neotropical, Colombia es el país con el mayor porcentaje de reportes no publicados.

El conocimiento sobre los efectos de los embalses en Colombia ha venido creciendo en los últimos veinte años (Figura 5). La formación del embalse Betania en el año 1987 fue el disparador de las diferentes publicaciones encontradas. En los últimos cinco años, aunque el número de reportes no publicados (literatura gris) continúa siendo importante, se ha reducido respecto a los publicados.

Los estudios de caso a nivel global reportan 35 efectos de los embalses sobre la ictiofauna dulceacuícola, basados en ellos identificamos diez impactos (Tabla 1). El cambio en las rutas de movimiento para las especies migratorias, el éxito de especies foráneas dentro del ensamblaje del embalse, el cambio en el ensamblaje de este sistema y el incremento en el conocimiento de la ictiofauna presente en los cauces modificados son los efectos más importantes (en términos del número) dentro de lo reportado a nivel global.

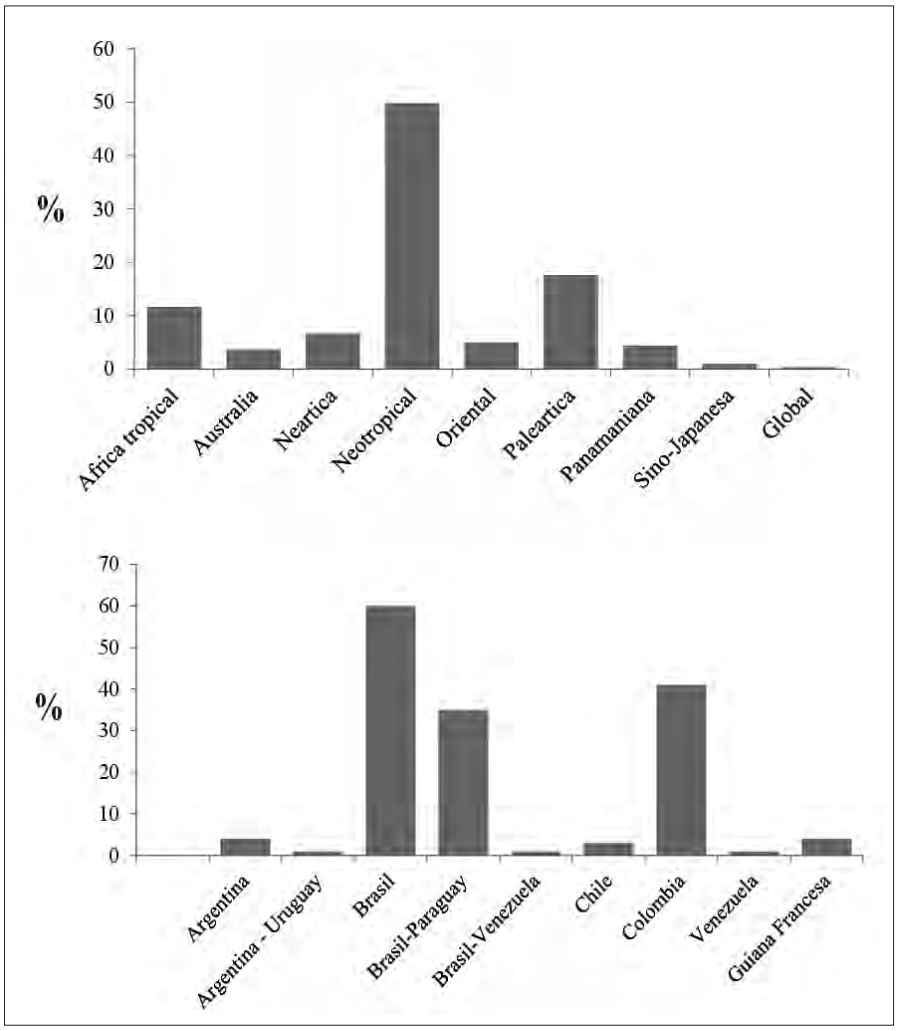

Figura 4. Número de trabajos encontrados (publicados y no publicados) por región biogeográfica, y dentro de la región neotropical, por país. Las regiones biogeográficas siguen a Holt *et al.* (2013).

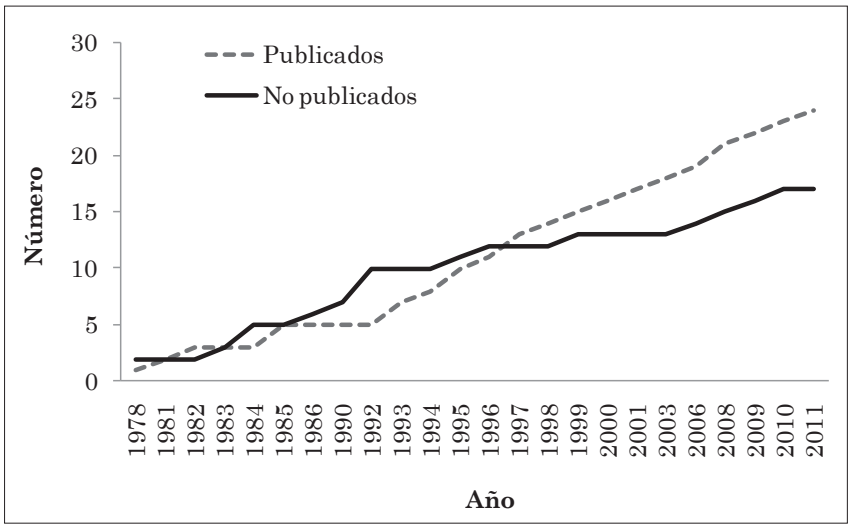

Figura 5. Distribución acumulada anualmente del número de estudios publicados y no publicados (literatura gris), en Colombia.

Tabla 1. Efectos que generan impactos sobre la ictiofauna, reportados en estudios de caso a nivel mundial y en Colombia debido a la formación de embalses para generación de energía eléctrica. El nombre del impacto (resultado de la interacción de los efectos) es resaltado en gris.

	Global	Colombia
Cambio de la ruta de migración de peces	**43**	**6**
Interrupción a rutas de migración de especies de peces de gran tamaño	9	2
Interrupción a rutas de dispersión y migración de especies de peces	34	4
Cambio en el uso del hábitat por los peces dentro del embalse	**15**	**2**
Características de los embalses influyen en la distribución de las especies que los habitan	15	2
Cambio en la actividad pesquera de la cuenca	**58**	**32**
Cambio en la actividad pesquera y en la productividad pesquera de la cuenca	58	32
Cambio en la estructura del ensamblaje en embalse	**128**	**16**
Acumulación de sustancias xenobióticas en embalse afecta reproducción de especies	2	0
Aislamiento de poblaciones de peces y reducción en el intercambio genético intra-población reduce la variabilidad genética de poblaciones aisladas dentro del embalse	1	0
Aumento en la abundancia de especies de escaso valor comercial favorecidas por condiciones lénticas del embalse	31	4
Calidad del agua del embalse afecta dinámica de poblaciones (crecimiento y talla)	8	0

Cont. **Tabla 1**. Efectos que generan impactos sobre la ictiofauna, reportados en estudios de caso a nivel mundial y en Colombia debido a la formación de embalses para generación de energía eléctrica. El nombre del impacto (resultado de la interacción de los efectos) es resaltado en gris.

	Global	**Colombia**
Cambio en la distribución de la biomasa de las especies dentro del embalse	2	0
Cambio en la oferta de alimento para la ictiofauna influye en el bienestar de los peces dentro del embalse	23	1
Cambio temporal en el ensamblaje dentro del embalse	7	0
Cambios en el ensamblaje (composición y disminución de la abundancia) del embalse	20	1
Depredación influye en biomasa de peces dentro del embalse	4	0
Embalse como área de crianza de algunas especies de peces	1	0
Incremento abundancia numérica de especies no nativas en el embalse	24	10
Incremento en la mortalidad de peces por disminución de oxígeno disuelto en el hipolimnio del embalse	1	0
Pérdida de hábitat dentro del embalse para nidificar debido a remoción de vegetación inmersa afecta el reclutamiento de algunas especies	2	0
Reducción de macrófitas afecta la estructura del ensamblaje dentro del embalse	1	0
Reducción en las poblaciones de peces migratorios dentro del embalse	1	0
Cambio en la estructura del ensamblaje en río aguas abajo del embalse	**54**	**0**
Cambios en la temperatura del agua afecta el desarrollo embrionario y modificación en el desarrollo ontogénico aguas abajo del embalse	7	0
Disminución de la riqueza aguas abajo del embalse	11	0
Disminución en la abundancia de las especies aguas abajo de la presa	8	0
Modificación en el reclutamiento de las poblaciones de especies debido a cambios en sus tácticas reproductivas aguas abajo del embalse	15	0
Modificación en el reclutamiento de poblaciones de especies debido a cambio en señales ambientales para desove asociadas con el cambio en tipo de pulso río abajo	11	0
Mortalidad por disminución de oxígeno disuelto aguas abajo del embalse	1	0
Reducción de la influencia del Pulso de caudal sobre el plano inundable genera Pérdida de áreas de crianza y alimentación para peces aguas abajo del embalse para peces aguas abajo del embalse	1	0
Cambio en la pesquería dentro del embalse	**21**	**2**
Manejo inapropiado de recursos pesqueros en el embalse	2	0
Reducción en poblaciones (abundancia y talla) de especies de interés pesquero en el embalse	17	2
Relación inversa en la CPUE de la pesca y el nivel del embalse	2	0

Cont. **Tabla 1**. Efectos que generan impactos sobre la ictiofauna, reportados en estudios de caso a nivel mundial y en Colombia debido a la formación de embalses para generación de energía eléctrica. El nombre del impacto (resultado de la interacción de los efectos) es resaltado en gris.

	Global	Colombia
Incremento en el conocimiento científico de la ictiofauna	**76**	**10**
Conocimiento de la ictiofauna (reporte de nuevas especies, estudios de riqueza, diversidad, dieta, reproducción)	76	10
Mayor efectividad en la mitigación por afectación de la ictiofauna	**21**	**10**
Desarrollo de nuevas tecnologías para mitigar efecto de embalses	6	0
Recuperación de variabilidad genética de la población de una especie nativa	15	10
Modificación de las relaciones entre pescadores	**6**	**2**
Conflictos con pescadores deportivos en el uso de los recursos pesqueros	6	2
Modificación en el ciclo de nutrientes en la cuenca	**3**	**0**
Retención de nutrientes en el embalse	1	0
Retención de nutrientes en el embalse afecta la producción agrícola en las zonas ribereñas aguas abajo del embalse	2	0

En Colombia, el mayor número ha sido respecto al cambio en la actividad y producción de la pesquería artesanal, y el cambio en la estructura del ensamblaje dentro del embalse.

La modificación del ensamblaje original dentro del embalse, el mayor conocimiento de la ictiofauna y el cambio en la actividad pesquera, fueron los más frecuentes a nivel global, sin embargo fue diferente entre latitudes. En la región Norte fueron más importantes en términos de su frecuencia el conocimiento científico de su ictiofauna, y el cambio en el ensamblaje, tanto dentro del embalse como aguas abajo de él. En la región Sur, el cambio en el ensamblaje dentro del embalse y aguas abajo de él, y la modificación en las migraciones de peces fueron los más frecuentes. Y en la región tropical, el cambio en el ensamblaje dentro del embalse, el conocimiento científico de sus peces, así como el cambio en la actividad pesquera, fueron los más recurrentes (Figura 6). En Colombia el impacto más reportado en los estudios de caso es el cambio de la actividad pesquera y el cambio en el ensamblaje dentro del embalse. Los cambios del ensamblaje aguas abajo del embalse y la modificación en la distribución de nutrientes en la cuenca no han sido reportados en los estudios de caso revisados.

Perspectivas en el desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca

Se obtuvieron datos de 240 embalses, de los cuales 14 % ya fueron construidos, 1 % está en construcción y 85 % en estudios. De los construidos, el 50 % tienen como única finalidad la generación de energía eléctrica y de los que se encuentran en construcción y en estudio, el 100 % y el 98 % serán para generar energía, respectivamente.

La capacidad instalada actual en los embalses es de 5522 MW, el 52 % se encuentra entre los 5-700 m de altitud, el 26 % entre los 700 y los 1300 y el 26 % arriba de los 1300 m. Al año 2027 el sector eléctrico planea alcanzar los 24000 MW. Para lograrlo están en estudios 205 embalses (174 de ellos con capacidad instalada menor a 100 MW) que se distribuyen a partir de los 100 m de altitud en la cuenca (48 % entre los 100 y 700 m de altitud, el 19 % entre los 700 y los 1300, y el 33 % arriba de los 1300 m) (Figura 7).

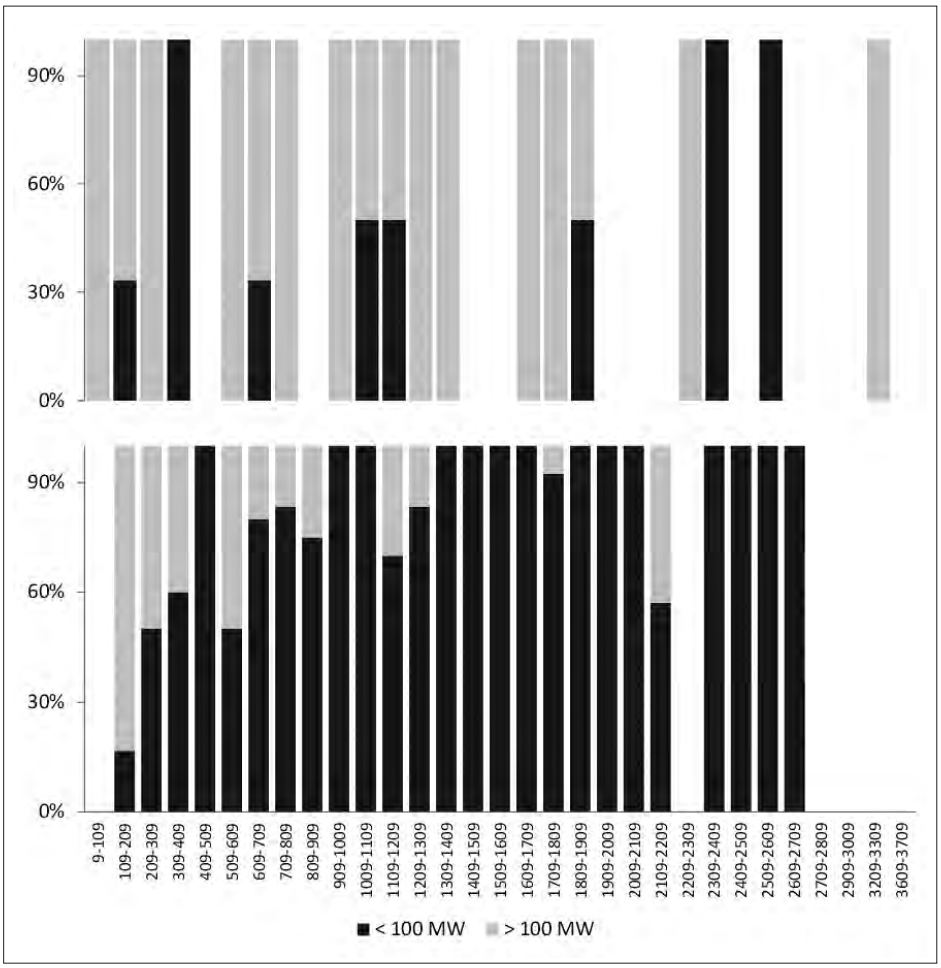

Figura 7. Distribución porcentual por intervalo de altitud (m) y capacidad instalada en embalses para generar energía eléctrica en la cuenca del río Magdalena-Cauca. Figura superior: construidos y en construcción, figura inferior: en estudio.

Discusión

La capacidad para generar energía eléctrica en Colombia debe responder a los requerimientos energéticos del país, resultado de su crecimiento económico. La planificación del crecimiento económico en particular de los usuarios no regulados (grandes empresas) ha llevado a que el sector minero energético tenga dentro de su plan de desarrollo duplicar la capacidad de generación de energía para el año 2027 y así satisfacer la demanda futura (UPME 2014). Así que la formación de nuevos embalses es una prioridad para aumentar la capacidad instalada.

La formación de un embalse dentro del cauce de un río genera cambios significativos en su estructura física y en su dinámica hidrológica, y como resultado de su interacción, en la biota que lo habita (Poff *et al.* 2007). Los cambios en la ictiofauna son de los más evidentes dado que muchas de sus especies son recurso proteico para la población humana y la modificación en la estructura del ensamblaje y en la oferta de peces, es rápidamente detectada por los pescadores (Agostinho *et al.* 2008, Hoeinghaus *et al*. 2009).

La distribución de la ictiofauna dulceacuícola en el gradiente altitudinal a lo largo de los cauces de los ríos en los Andes está fuertemente influenciada por la pendiente, la velocidad y temperatura del agua (Jaramillo-Villa *et al.* 2010), lo que conlleva la

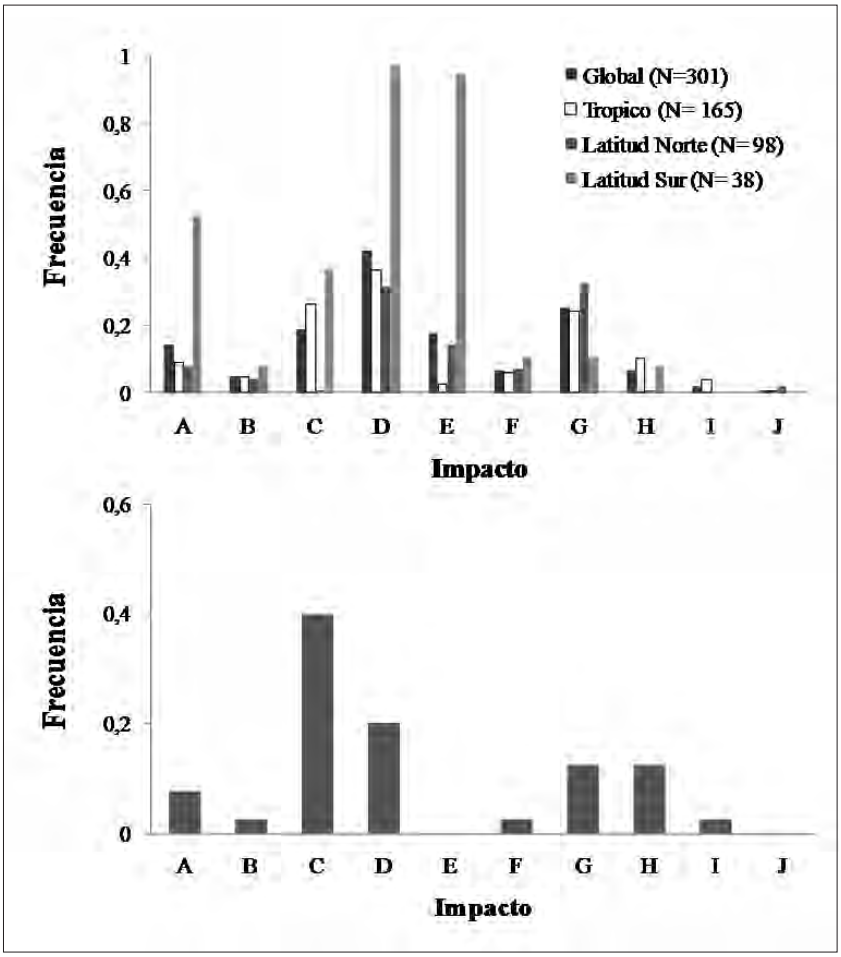

Figura 6. Frecuencia de reporte de los impactos que generan la formación de embalses para la generación de energía eléctrica a nivel global (superior) y en Colombia (inferior). **A.** Cambio de la ruta de migración de peces. **B.** Cambio en el uso del habitat por los peces dentro del embalse. **C.** Cambio en la actividad pesquera de la cuenca. **D.** cambio en la estructura del ensamblaje en embalse. **E.** cambio en la estructura del ensamblaje en río aguas abajo del embalse. **F.** Cambio en la pesquería dentro del embalse. **G.** Incremento en el conocimiento científico de la ictiofauna. **H.** Mayor efectividad en la mitigación por afectación de la ictiofauna. **I.** Modificación de las relaciones entre pescadores. **J.** Modificación en el ciclo de nutrientes en la cuenca.

formación de ensamblajes de especies particulares a la altitud. Los sectores del cauce abajo de los 700 m de altitud son los más ricos en especies. En estos sectores la oferta de diferentes ambientes acuáticos es alta, se pueden encontrar desde pequeñas quebradas, ríos de cauce amplio y plano lateral generoso, hasta extensas áreas de lagos que recurrentemente son inundados por las crecientes del río (Maldonado *et al.* 2012). Aunque la gran variedad de ambientes acuáticos en estos sectores puede ser la causa de la mayor riqueza de especies, esta es una hipótesis que requiere ser verificada.

A medida que se incrementa la altura, la temperatura del agua se reduce y la velocidad del agua aumenta, resultado de la mayor pendiente del cauce (Lewis 2008). Estas condiciones generan cambios en la composición del ensamblaje de especies peces y ya son más frecuentes especies de pequeño porte que han desarrollado estructuras que le permiten vivir en

dichos ambientes (Winemiller *et al.* 2008). La boca en forma de ventosa y fuertes aletas pectorales y pélvicas de especies del género *Astroblepus* y de la familia Loricariidae son de las características más evidentes y que se asocian con el tipo de ambiente acuático en el que habitan estas especies (Maldonado *et al.* 2005).

Los ensamblajes de especies de peces que están fuertemente asociados con las características del hábitat físico que se presenta en los cauces en altitudes por debajo de los 700 m, cambian temporalmente debido a la llegada de ejemplares de especies migratorias (Jiménez-Segura *et al.* 2014, en este número). Estas especies utilizan diferentes ambientes acuáticos durante sus periodos de vida así como en los momentos hidrológicos de la cuenca del río Magdalena-Cauca, siendo las lluvias y el nivel del agua de los ríos las principales señales ambientales para iniciar las migraciones (Jimenez-Segura *et al.* 2010). Cerca del 15 % de las especies de la cuenca tienen comportamiento migratorio y la mayoría de ellas son la base para la pesquería artesanal en Colombia (Lasso *et al*. 2011). Algunas de las especies migratorias más conocidas son *Prochilodus magdalenae*, *Brycon moorei*, *Salminus affinis*, *Cyphocharax magdalenae*, *Triportheus magdalenae*, *Curimata mivartii*, *Leporinus muyscorum*, *Ichthyoelephas longirostris*, *Pimelodus blochii*, *Pseudoplatystoma magdaleniatum* y *Sorubim cuspicaudus* (Usma *et al.* 2013).

Durante las últimas cinco décadas, el conocimiento sobre la dinámica de las migraciones provenía del conocimiento de los pescadores y de los datos de producción de su captura. Ahora se cuenta con datos detallados que describen rutas, distancias y tiempos de migración. Basados en investigaciones inéditas a la fecha sobre periodos y lugares de desove de estas especies se ha encontrado que la migración se sucede entre cuatro ambientes acuáticos: ciénagas, caños de conexión entre las ciénagas y el cauce principal del río, el cauce principal del río Magdalena-Cauca, y los tributarios (Figura 8). En términos de la distancia de recorrido de peces marcados en el río La Miel o el río Sogamoso (cuenca media del río Magdalena), el

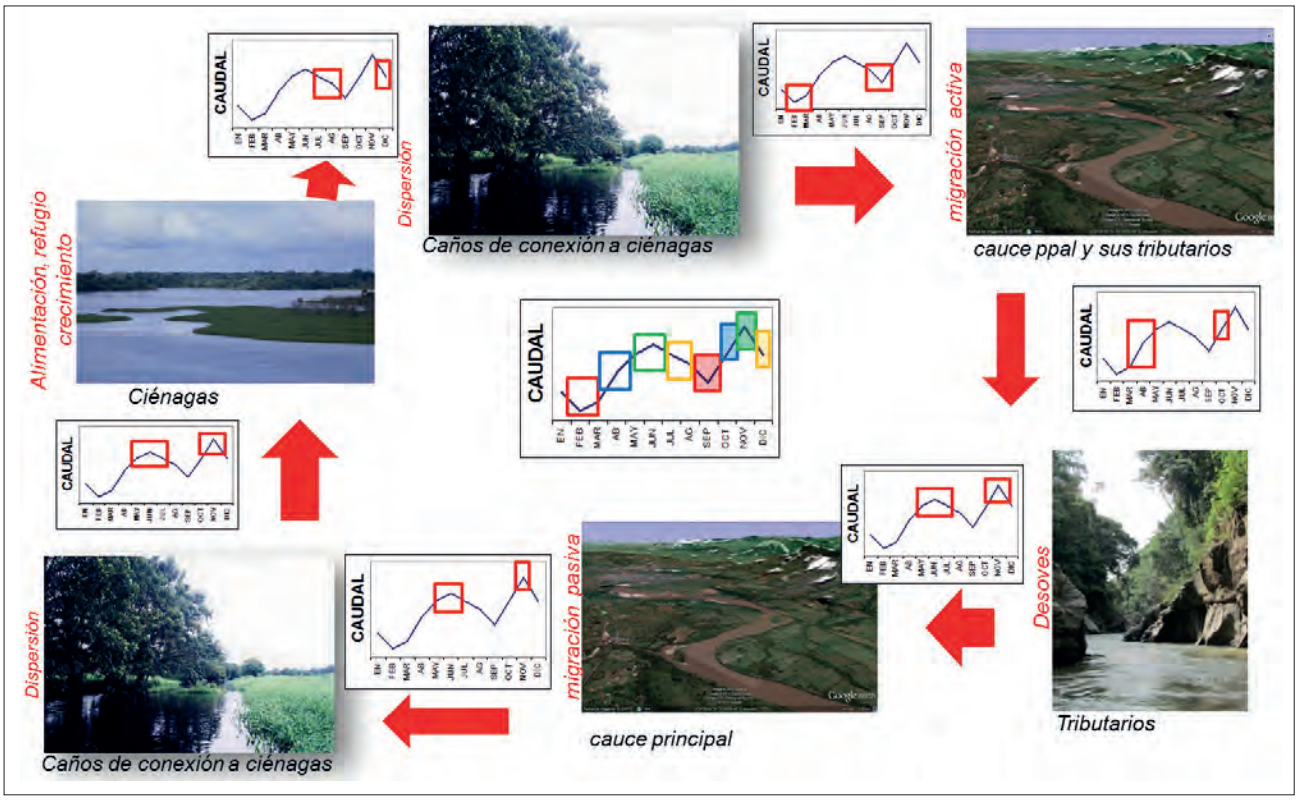

Figura 8. Ciclo de migración entre los diferentes sistemas acuáticos en la cuenca del río Magdalena-Cauca.

valor medio fue de 33 km pero el rango estuvo entre cero y un poco más de 1200 km, y esta amplitud se asoció con la especie. El reporte de la distancia promedio que recorren los ejemplares de *Salminus affinis* fue de 62 km, el de *P. magdalenae* de 34 km, el de *I. longirostris* de 26 km y el menor valor para *S. cuspicaudus* de 0,8 km (López-Casas *et al.* 2013). Si se tiene en consideración la altitud máxima de migración reportada y la distancia total del cauce del río Magdalena abajo de los 700 m de altura es de 1542 km y la del río Cauca 1350, los valores reportados de movimiento de estos peces pueden ser considerados altos para *P. magdalena* (López-Casas *et al.* 2013) y como medios para la mayoría de las especies, tal y como ha sido planteado en Usma *et al.* (2013). Entonces durante cada periodo de aguas bajas o de aguas altas, los peces recorren aguas arriba y aguas abajo estas distancias a lo largo de los cauces de los ríos ó de los caños que comunican los cauces con las ciénagas.

Durante el periodo de aguas bajas, buena parte de los peces migratorios salen de las ciénagas debido a que las condiciones de hábitat se tornan desfavorables (p. e. baja concentración de oxígeno disuelto, alta temperatura del agua, reducción del área y de la profundidad, mayor depredación). En esta primera fase del ciclo de migración, aunque la mayoría de los peces se mueven desde la ciénaga hacía el cauce principal del río, algunos permanecen en los caños de conexión con el río o dentro la ciénaga. Durante la segunda fase los peces que salieron de la ciénaga hacía el cauce del río comienzan a moverse río arriba y a madurar sus gónadas. Muchos de estos peces ingresan a los tributarios y permanecen en ellos durante las aguas bajas. Una vez comienzan las lluvias, y con ellas el incremento en el nivel del agua, comienza la tercera fase: los peces que están en el cauce principal del río se mueven a los tributarios a desovar, así como los que permanecieron allí durante las aguas bajas. A medida que el caudal aumenta, los adultos y los embriones derivan hacía aguas abajo por el cauce principal del río, durante esta migración pasiva los embriones se incuban. Finalmente, la cuarta fase comienza cuando las crecientes hacen que el río se desborde e ingrese a las ciénagas, y con él, ingresan los adultos y sus larvas. En las ciénagas los peces encuentran refugio y alimento para crecer durante el periodo de aguas altas. En este momento el ciclo de migración finaliza y se reiniciará nuevamente con la próxima reducción del nivel del agua.

Con base en el conocimiento que se tiene de la ictiofauna dulceacuícola de la cuenca del río Magdalena y de los efectos definidos por los estudios de caso sobre la respuesta de los peces ante la formación de un embalse en el cauce de un río, se puede analizar las implicaciones que el desarrollo del sector hidroeléctrico tiene y tendrá para la conservación de los peces en la cuenca del río Magdalena-Cauca, a la luz del gradiente altitudinal que se conoce en la estructura de los ensamblajes de peces.

El cambio en la estructura del ensamblaje ribereño original producto de la modificación que genera un embalse en las condiciones del sistema ribereño (flujo unidireccional, altas velocidades de agua, turbulencia) ha sido el cambio más reportado a nivel mundial y regional. Este cambio es producto de varios efectos que actúan sinérgicamente en el reclutamiento de las poblaciones de las especies ribereñas: la interrupción en la ruta de dispersión y migración, el cambio en la oferta de alimento, en las señales ambientales asociadas con la maduración y el desove, y en las condiciones que favorecen el crecimiento individual y reducen la depredación. En Colombia son pocos los estudios de caso que permitan dimensionar este cambio. Cala (1995) lo describió basado en los niveles tróficos del ensamblaje de peces en el embalse de Betania. Recientemente Álvarez y Jiménez-Segura (2014) encontraron que la ictiofauna remanente en los embalses del río Porce (localizados entre los 500 y los 900 m de altitud en la cuenca del río Cauca) (Figura 9), aunque conserva algunas de las especies del ensamblaje ribereño original, es pobre en especies (seis especies) y la presencia de especies exóticas es importante. De hecho, su abundancia permite sostener una productiva pesquería (EPM 2014). Adicionalmente, encuentra que la formación del embalse genera gradientes locales en la riqueza de especies, siendo las quebradas tributarias al embalse y el cauce del río con flujo continuo los que mayor número de especies albergan. Esto sugiere que un embalse rompe el gradiente altitudinal reportado (Jaramillo-Villa *et al.* 2010, Jiménez-Segura *et al.* 2013) y crea nuevos gradientes de riqueza dentro del área de influencia de los embalses.

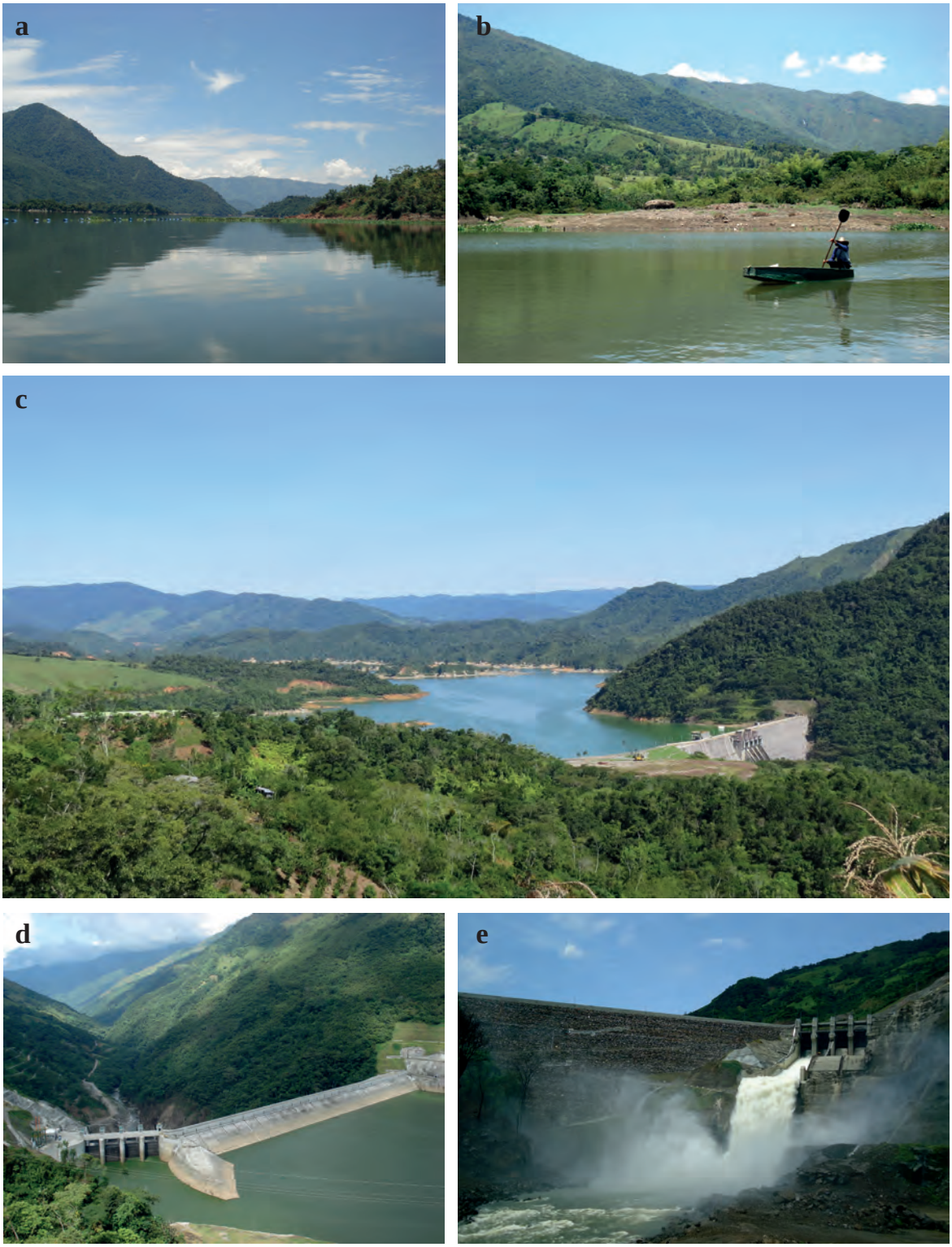

Figura 9. Embalse Porce, cuenca del río Cauca. **a. b. y c.** Embalse Porce II. **d y e.** Embalse Porce III.

La pérdida del cauce embalsado así como el que esta aguas arriba del embalse como ruta de migración de ejemplares de especies migratorias, es otro de los efectos más recurrentes en los reportes a nivel mundial (Makrakis *et al*. 2012, Greathouse *et al*. 2006). La presencia de la presa fragmenta el continuo del río y elimina el sector del cauce localizado aguas arriba de ella, como ruta de movimiento río arriba de los peces que vienen desde el sector de aguas abajo (Esguícero y Arcifa 2010). Las descripciones realizadas por Agostinho *et al*. (2007) sobre las migraciones de peces desde los embalses hacía aguas arriba de éstos en el río Paraná, son resultado de la interacción entre la presencia de lagos dentro del plano lateral del cauce que está en el sector entre los embalse de Porto Primavera y el embalse de Itaipú a lo largo de un trecho de 200 km (Agostinho *et al.* 2004). Esto permite que existan sectores extensos del cauce asociados con bajas pendientes que facilitan la migración y el desove, así como lagos inundables que permiten el reclutamiento natural de las poblaciones. Esta situación ha permitido que luego de casi 30 años de desarrollo hidroeléctrico en el río Paraná aún persistan poblaciones de especies migratorias dentro de este sector embalsado del río.

En nuestro país, Pareja et *al.* (2014) han encontrado que en el sector del río Magdalena aguas arriba del embalse de Betania aún se observan desoves de especies migratorias. Entender los factores ambientales que permiten que los peces migren y encuentren las señales apropiadas para desovar en estos sectores aislados, así como el efecto de la barrera sobre el aislamiento en el flujo genético de las poblaciones, son temas que esta por conocerse en la cuenca.

En Colombia, la mayoría de los embalses para generar energía eléctrica se encuentran en tributarios al río Magdalena o al río Cauca, que drenan las regiones montañosas de los Andes y sus cauces son de fuerte pendiente (longitudinal y lateral) con un plano lateral poco desarrollado. Así que en su mayoría son embalses profundos, cuyo cauce arriba del embalse tiene fuerte pendiente y las ciénagas son inexistentes. El embalse en el río Sogamoso es una de las excepciones dado que se ubica en el sector del cauce entre el límite entre el sector medio que es montañoso y, el sector bajo donde el cauce presenta plano lateral inundable la ciénaga El Llanito se localiza a 70 km de la presa. Los embalses de Betania y Salvajina así como los que se encuentran en construcción como El Quimbo y Pescadero-Ituango, difieren dentro del conjunto de embalses ubicados en los tributarios porque están directamente sobre el cauce principal de los ríos Magdalena y Cauca, y en algunos casos presentan plano lateral desarrollado y presencia de ciénagas arriba del embalse o aguas abajo de él. En el caso de Betania en el río Magdalena, la primera ciénaga (ciénaga de Guarinocito) se encuentra a 420 km de distancia de la presa. En el río Cauca las áreas cenagosas se encuentran a 50 km (sector El Congo) aguas abajo del embalse Salvajina, y el futuro embalse Pescadero-Ituango tiene áreas cenagosas 500 km aguas arriba (arriba de La Virginia, Risaralda) y 86 km aguas abajo. Entonces, la posición del embalse dentro de la cuenca y la posibilidad de que la pendiente del cauce favorezca la migración aguas arriba y que se den las condiciones para la incubación de los embriones producto de los desoves así como que existan rutas de migración alternativas aguas abajo y se conserven ciénagas conectadas al cauce, serán factores fundamentales para que las poblaciones de especies migratorias persistan en estas cuencas reguladas.

López-Casas *et al.* (2014) encontraron en el río La Miel (cuenca del río Magdalena), que si bien la presa del embalse Amaní-central Miel I actúa como barrera a la migración, los peces migratorios ingresan por los túneles de descarga del agua turbinada, permanecen en la caverna de oscilación y pueden retornar rápidamente de nuevo al cauce del río (al menos un día), para dirigirse a otros ríos de flujo libre como rutas de migración alternativas. Esta estrategia también ha sido reportada por en cauces de ríos brasileros aguas abajo de las presas (Antonio *et al.* 2007). Dada la diversidad geomorfológica de las cuencas donde se encuentran los embalses colombianos, las rutas y distancias que logran migrar los peces aguas arriba del embalse donde quedaron atrapados luego del aislamiento es aún un tema por conocer en nuestro país.

Si bien, la modificación en la estructura del ensamblaje aguas abajo del embalse, es un cambio poco frecuente

en los estudios de caso encontrados a nivel global, en Colombia no se encontraron estudios de caso visibles, al menos en internet. Jiménez-Segura *et al*. (2014) afirmaron que la estructura del ensamblaje de peces del río La Miel aguas abajo de la descarga de turbinas no había tenido cambios importantes en su riqueza y diversidad durante los últimos nueve años debido a que existe un tributario importante (río Samaná), que no ha sido intervenido para el desarrollo hidroeléctrico. Esto permite que sea una ruta de migración alternativa y que dado que tiene caudal similar al del río la Miel, sirva como amortiguador de las condiciones generadas por los cambios diarios en el nivel del agua que genera la operación de la central hidroeléctrica Miel I. De Fex y Jiménez-Segura (2011) encontraron que a cambios diarios en el nivel del agua asociados a la operación (conocidos como "hydropeaking"), modifican el desarrollo de las células de la hipófisis (gonadótropos) que regulan la maduración del tejido gonádico en *Prochilodus magdalenae*, cambiando así el proceso fisiológico que lleva a la maduración y al desove de ésta especie en el río La Miel, el cual en condiciones naturales es desencadenado por la interacción entre la reducción en el brillo solar, el cambio ascendente y sostenido en el nivel del agua, la reducción en la conductividad y el incremento en la turbidez (Jiménez-Segura 2007).

Las montañas de los Andes emergieron hace ocho millones de años y con ella la conformación de las cuencas de ríos suramericanos que drenan hacía el nor-occidente y hacía la región amazónica (Lundberg *et al.* 2003). Los suelos andinos son recientes dado que están formados por depósitos del Cuaternario y son de fácil erosión; es por ello que los ríos suramericanos de origen andino se caracterizan por presentar las mayores cargas de sedimentos a nivel global (Restrepo *et al.* 2005). Los sedimentos viajan río abajo y se depositan periódicamente en los planos laterales durante los periodos de máximas crecientes. La modificación en la distribución de nutrientes asociados con los sedimentos aguas abajo de los embalses es otro de los impactos reportados a nivel mundial (Childs 2010). Vörösmarty *et al.* (2003) estima que los embalses construidos a esa fecha en la cuenca Magdalena-Cauca retienen entre el 20 y el 40 % de los sedimentos producidos por la cuenca. Restrepo (2003) demuestra una reducción evidente en la carga de sedimentos de los ríos Magdalena, Nare y Bogotá, luego de la formación de los embalses (Betania en el río Magdalena; Neusa, Tominé, Chuza, San Rafael en el río Bogotá; El Peñol, Jaguas, San Lorenzo y Punchina en el río Nare). Al ser retenidos los sedimentos en el embalse, el agua que pasa por las turbinas y que se descarga aguas abajo de la presa tendrá menor carga de sedimentos y con ello mayor capacidad de abrasión. Esta particularidad toma importancia en el balance hidrológico entre el cauce y el plano lateral aguas abajo de la presa, especialmente en aquellos cauces cuyo sustrato está conformado por partículas finas (limos, arcillas), en los que el planos lateral es inundado periódicamente por las crecientes y que tienen presencia de ciénagas. En cuanto mayor sea la retención de sedimento, mayor será la capacidad de abrasión del agua turbinada (Petts 1984, Gordon y Meentemeyer 2006). Esto llevará a que el sustrato sea fácilmente removido, el cauce aumente su profundidad progresivamente y las márgenes se erosionen (Childs 2010). El incremento en la profundidad (socavación del lecho) llevará a que la conexión hidrológica con el plano lateral se reduzca debido a que los incrementos en el nivel del agua (ya regulados por la operación de la central), no tendrán la capacidad de desbordar el cauce y llevar el agua hacía el plano lateral. Así, las ciénagas perderán paulatinamente su conexión con el cauce principal. Aunque este proceso aún no ha sido reportado en Colombia, el estado actual de sedimentación del caño de conexión río Sinú-ciénaga de Lorica (obs. Pers.) puede ser resultado de la reducción en la influencia temporal que tenía el río Sinú en ésta área de crianza debido a la posible de la socavación del lecho del río y la reducción en la magnitud de las crecientes que ha generado el embalse Urrá II.

La interacción entre la retención de sedimentos que hacen los embalses, la estructura del lecho de cauces aguas abajo de las presas y la conectividad hidrológica entre el cauce principal y su plano lateral, es un proceso que debe ser analizado con mayor detalle teniendo en cuenta que puede generar una de las mayores afectaciones en la sobrevivencia de las larvas de peces migratorios y con ello reducir el reclutamiento de sus poblaciones. En la cuenca del río Magdalena-Cauca buena parte de los embalses ya construidos antes de 1990 se encuentran localizados en los sectores alto y medio de la cuenca tributaria.

En los sectores altos, los cauces presentan sustratos conformados principalmente por partículas gruesas (gravas, rocas) que reducen la capacidad de socavación del lecho, así como un plano lateral poco desarrollado y ausencia de ciénagas. Estas condiciones han permitido que el análisis del efecto de los embalses sobre el balance en la conexión hidrológica con su plano lateral no haya sido analizado. Sin embargo, la reciente construcción y formación de embalses en tributarios (p. e. en el río Sogamoso y en el bajo río Cauca), que presentan en el sector bajo de su cuencas extensos planos laterales inundables y ciénagas, hace que el análisis tome la mayor importancia, dado que la interacción entre la reducción en la magnitud de las crecientes y la socavación del lecho en los cauces aguas abajo de la presa creará un efecto sinérgico negativo en la conectividad cauce-plano lateral. En términos biológicos, se puede perder el acceso de las larvas de peces migratorios (que vienen derivando a lo largo del cauce y desde los lugares de desove) a sus zonas de desarrollo y protección. Esto será definitivo en el estado de las poblaciones de peces migratorios y de paso, en la producción pesquera de la cuenca Magdalena-Cauca.

El recurso pesquero reofílico en la cuenca Magdalena-Cauca posee importancia a nivel económico y social para las comunidades de pescadores, especialmente en las partes medias y bajas de la cuenca, y en particular aquellas asociadas a planicies inundables. Cuarenta especies nativas son aprovechadas por la pesca artesanal y se ha estimado que el valor del total del producto pesquero comercializado en la cuenca alcanza $368.853 millones de pesos colombianos al año; recursos generados por más de 32.798 pescadores y aproximadamente 157.000 personas que dependen del recurso pesquero para su subsistencia y seguridad alimentaria (Valderrama *et al.* 2014 *en prensa*). La captura de las especies migradoras es la más significativa. Los desembarques de pescado en el año 2013 en los principales centros de acopio (AUNAP-Universidad del Magdalena 2014) estuvieron representados en un 69 % por nueve especies migradoras como *Prochilodus magdalenae* (23,2 %), *Pseudoplatystoma magdaleniatum* (17,5 %), *Pimelodus blochii* (11,7 %), *Sorubim cuspicaudus* (9,3 %), *Leporinus muyscorum* (6,4 %), *Pimelodus grosskopfii* (1,3 %) y menores a 1 % *Icthyoelephas longirostris*, *Brycon moorei* y *Salminus affinis*. En los embalses ubicados por debajo de los 1000 m de altitud, aunque el aporte de las especies migratorias es poco, la producción pesquera alcanza 2180 ton. año^{-1}, se basa en especies foráneas como las del género Coptodon, y se estima que hay cerca de 2010 pescadores que dependen económica y socialmente de un espejo de agua embalsado cercano a las 28954 ha (Valderrama *et al.* 2014 *en prensa*).

Si bien los registros de captura de la pesca artesanal en la cuenca del río Magdalena-Cauca sufren de sesgos asociados con el método usado, existe una tendencia negativa de reducción de los desembarcos y/o capturas, reportada a nivel general por los pescadores. Esta situación es generalizada a nivel mundial en las pesquerías de las aguas dulces y en la pesca marina (FAO 2014). En 1998, Pauly en su clásica publicación *Fishing down in the food web* afirmó que la pesquería había sufrido un cambio significativo en el nivel trófico de las poblaciones que usaba. Se pasó de la explotación hasta el agotamiento de poblaciones de especies piscívoras, de mayor tamaño y altas fecundidades, a especies de niveles tróficos menores (omnívoros, detritívoros), de menor tamaño y menores fecundidades (Pauly *et al.* 1998). Esto también ha sucedido en la captura de los pescadores en la cuenca del río Magdalena-Cauca. Las especies objetivo hace cuatro décadas eran los grandes depredadores como *Pseudoplatystoma magdaleniatum*, *Salminus affinis* y *Sorubim cuspicaudus*; actualmente la pesca es sostenida en un 90 % por el detritívoro *Prochilodus magdalenae*. Es importante resaltar que a pesar de que la sobrepesca ha sido en parte responsable de la reducción en las poblaciones de peces de los mayores niveles tróficos, la modificación de los sistemas acuáticos es mucho más eficiente en su deterioro dado que afecta directamente la sobrevivencia de sus primeros periodos de vida (embriones y larvas), y de paso su reclutamiento y lo que en su conjunto es definitivo para definir el tamaño de la población. En esto, el desarrollo del sector minero-energético (embalses, minería aluvial), así como el desarrollo del sector agropecuario en las áreas cenagosas, tienen responsabilidad, dado que su crecimiento está basado en la modificación de los sistemas acuáticos que son importantes para el sostenimiento de las poblaciones de peces en el tiempo.

A pesar de que Colombia es uno de los países del Neotrópico con mayor número de estudios de caso sobre embalses, cerca del 50 % no han sido publicados y muchos de ellos se han concentrado en caracterizar el cambio de la actividad pesquera y en el conocimiento de la ictiofauna. Con la formación de un embalse, la primera y más evidente respuesta son las características de la pesquería artesanal: sus especies objetivo, los aparejos de pesca, la inversión económica y la temporalidad. En el embalse, los pescadores que anteriormente usaban el río buscan aquellos peces de especies migratorias que quedaron atrapados pero en primera instancia deben cambiar sus métodos de pesca ya que sus atarrayas y redes de arrastre no son efectivas en un sistema de grandes profundidades y zona litoral poco desarrollada. A medida que avanzan los años, dado que no hay reclutamiento de estas especies dentro del embalse, las especies objeto de pesca pasan a ser diferentes. Ahora usaran aquellas a las que le son favorables las condiciones del nuevo sistema: generalmente especies de pequeño porte, bajas fecundidades y bajo valor comercial. Aunque son especies por las cuales reciben menos recursos, el balance económico se logra al considerarse que las jornadas de pesca requieren una baja inversión (p. e. redes de espera, movilidad a remo, ausencia de carnada) y a que hay una oferta permanente de estas especies ya que su disponibilidad no se asocia con los periodos hidrológicos. Por el contrario, aguas abajo el embalse la pesca basada en especies migratorias persiste. Sin embargo, las nuevas características que le impone al río el cambio en el nivel del agua generado por la turbinación hacen que la inversión en la jornada de pesca sea alta (p. e. mayor inversión en combustible, menor efectividad de los aparejos de pesca) (López-Casas *et al.* 2013). A esto se le suma la reducción en la oferta de peces a lo largo del tiempo debido al deterioro de los sistemas acuáticos. La situación ha llevado a que la actividad del pescador sea menospreciada por la sociedad, y que el paso de su conocimiento y cultura a las siguientes generaciones se ponga en riesgo dado que los padres evitan que sus hijos los acompañen en sus jornadas de pesca.

La proyección en el desarrollo de embalses como proveedores de energía hidroeléctrica no es un buen augurio para la conservación de la ictiofauna dulceacuícola presente en la cuenca Magdalena-Cauca. La distribución altitudinal potencial de los embalses a lo largo del eje altitudinal de los cauces en la cuenca (Figura 10), generará impactos acumulativos a lo largo de la cuenca que afectarán no sólo a las poblaciones de especies migratorias sino a aquellas endémicas que se encuentran en cauces arriba de los 1300 m. Es por ello que es prioritario aportar a la planificación del desarrollo del sector energético la información biológica relevante que permita reducir los efectos que puede ocasionar el desarrollo tal y como se ha planteado por sector energético en nuestro país. La generación de conocimiento biológico proveniente de iniciativas de investigación desde las empresas del sector hidroeléctrico han sido definitivas para lograrlo.

Las empresas del sector eléctrico en Colombia desarrollan múltiples e innovadoras estrategias de manejo que buscan prevenir, compensar y mitigar los impactos. El rescate y traslado de peces, el monitoreo a las migraciones de peces, la restauración física de sistemas acuáticos, el diseño de caudales "ambientales" y el repoblamiento son algunas de las más utilizadas. Su descripción y análisis pueden ser objeto de una nueva publicación sobre el tema dada la diversidad de acciones que se vienen desarrollando. A pesar de estas valiosas iniciativas, los embalses son uno de los factores, que de manera sinérgica interactúan con otros muchos que se observan en la cuenca (p.e. sobrepesca, minería fluvial, contaminación del agua, deforestación, avance del sector agropecuario sobre las ciénagas, entre otros) y que afectan el estado de conservación de los peces en la cuenca del río Magdalena-Cauca.

Se puede afirmar que el desarrollo del sector eléctrico basado en el uso del agua de los ríos andinos han aportado al cambio los sistemas acuáticos dulceacuícolas y ha reorganizado la estructura de los ensamblajes de especies, en particular de aquellos presentes en los embalses. La perspectiva de progreso en la generación de hidro-energía tendrá una fuerte influencia en la conformación de los ensamblajes de especies de peces asociados con el intervalo altitudinal y en los sistemas acuáticos que permiten el reclutamiento de las especies migratorias. Aquellos embalses construidos arriba de los 700 m de altitud modificarán sectores del cauce donde habitan especies de pequeño porte, y aunque no representan gran interés como recurso proteico para la población colombiana,

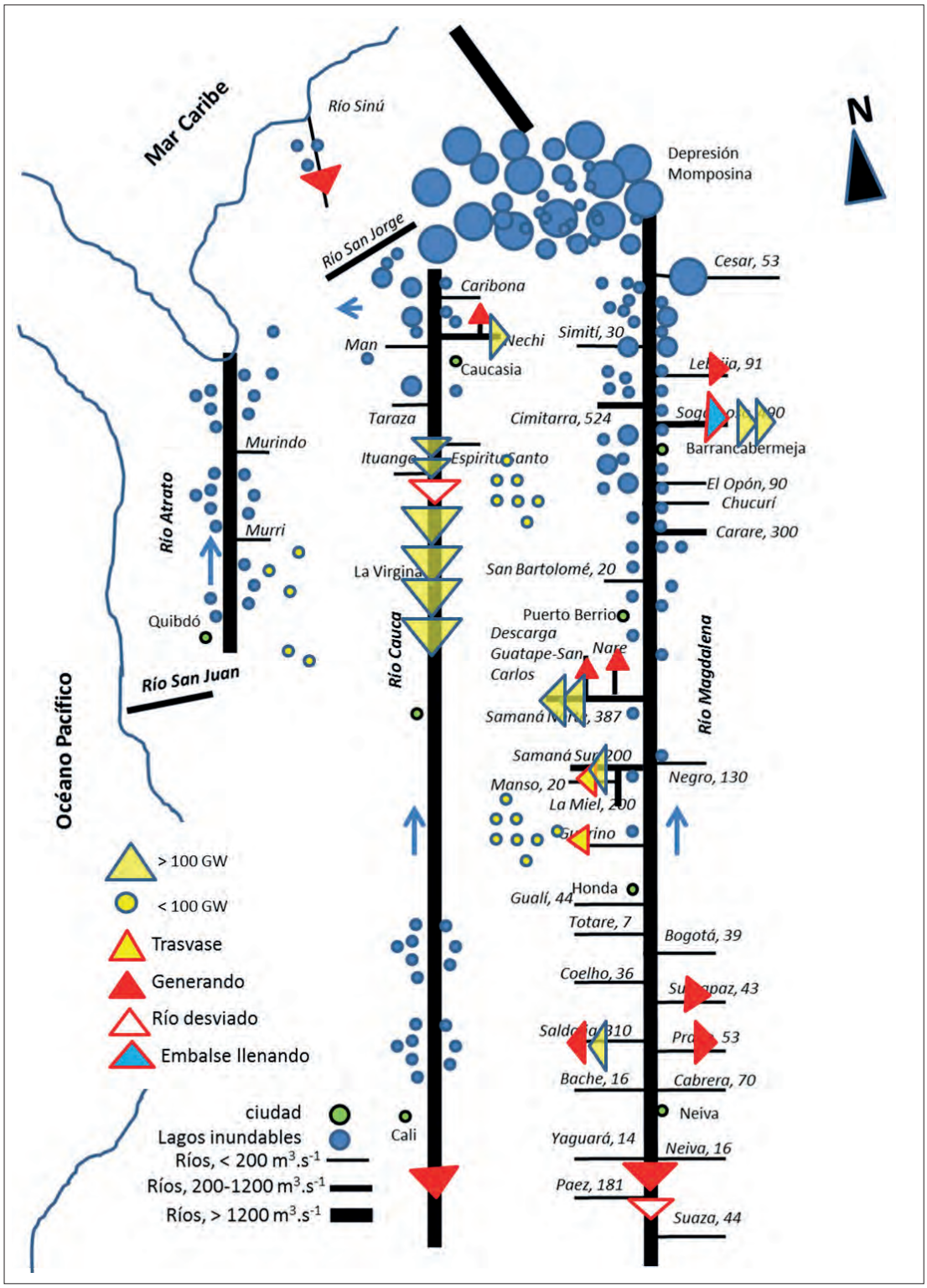

Figura 10. Diagrama simplificado de las cuencas trasandinas y localización de embalses para generar energía eléctrica (construidos, en construcción y en estudios) en la cuenca del río Magdalena-Cauca. Símbolos con relleno amarillo y borde azul son embalses en estudio. El número que acompaña al nombre del río corresponde al caudal medio anual.

más del 80 % de estas especies son endémicas de la cuenca, por lo que tendría un gran impacto en la conservación de la biodiversidad y el correcto funcionamiento de los sistemas, ya que su presencia allí es resultado de miles de años de evolución. Por su parte, los embalses cuya construcción es aguas abajo de los 700 m, influirán negativamente en el reclutamiento de las poblaciones de especies migratorias, que son las que sostienen la actividad pesquera en la cuenca Magdalena-Cauca.

La sociedad colombiana debe tomar conciencia de que su crecimiento así como su desarrollo tiene consecuencias en la conservación de los sistemas naturales. La pesca es un servicio ecosistémico que debe ser garantizado a los pobladores ribereños, así como a la sociedad colombiana. La oferta de peces para los pescadores artesanales depende del bienestar y conectividad de los sistemas acuáticos en la cuenca Magdalena-Cauca como un todo, así que es prioritario que todos los sectores productivos de nuestro país confluyan en un gran esfuerzo para desarrollar estrategias que eviten efectivamente su deterioro.

Agradecimientos

La autora principal agradece a las empresas Isagen S. A. E.S.P. y a Empresas Públicas de Medellín EPM por su interés en conocer la respuesta de los peces a la modificación en que se incurre al construir un embalse. Varios de los artículos, tesis de pregrado y maestría citados son producto de convenios de cooperación para la investigación sobre este tema entre éstas empresas y la Universidad de Antioquia (Convenio Isagen S.A.-Universidad de Antioquia No. 46/3296. Convenio EPM-Universidad de Antioquia No. 2011-000558).

Literatura citada

Abell, R., M. Thieme, C. Revenga, M. Bryer, M. Kottelat, N. Bogutskaya, B. Coad, N. Mandrak, S. Contreras-Balderas, W. Bussing, M. Stiassny, P. Skelton, G. Allen, P. Unmack, A. Naseka, N. Sindorf, J. Robertson, E. Armijo, J. Higgins, T. Heibel, E. Wikramanayake, D. Olson, H. López, R. Reis, J. Lundberg, M. Sabaj Pérez y P. Petry. 2008. Freshwater ecoregions of the World: a new map of biogeographic units for Freshwater Biodiversity Conservation. *BioScience* Vol 58 (5): 403-414.

Albert J., P. Petri y R. Reis. 2011. Major biogeographic and phylogenetic patterns. Pp: 21-56. *En:* Albert J. y R. Reis (Eds.). Historical biogeography of Neotropical freshwater fishes. University of California Press. Londres, Inglaterra.

Alvárez J. y L. F. Jiménez-Segura. 2014. Ictiofauna en embalses en cascada: el caso del río Porce. Tesis de maestría. Instituto de Biología, Universidad de Antioquia. 60 pp.

Agostinho, A. A., L. C. Gomes, S. M. Thomaz y N. S. Hahn. 2004. The Upper Paraná river and its floodplain: main characteristics and perspectives for management and conservation. Pp. 381-393. *En*: Thomaz, S. M., A. A. Agostinho y N. S. Hahn (Eds.). The Upper Paraná River and its floodplain: physical aspects, ecology and conservation. Leiden. Backhuys Publishers.

Agostinho, A. A., F. M. Pelicice y L. C. Gomes. 2008. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. *Brazilian Journal of Biology* 68 (4): 1119-1132

Agostinho, A. A., L. C. Gomes y F. M. Pelilice. 2007. Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatorios do Brasil. Maringa. EDUEM. 501 pp.

Antonio, R. R., A. A. Agostinho, F. M. Pelicice, D. Bailly, E. K. Okada y J. H. Pinheiro-Dias. 2007. Blockage of migration routes by dam construction: can migratory fish find alternative routes?. *Neotropical Ichthyology* 5 (2): 177-184

Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP) y Universidad del Magdalena. 2014. Base de datos de estadísticas pesqueras en la cuenca Magdalena-Cauca. Año 2013. Bogotá, Colombia (archivo digital).

Avakyan, A. B. y V. B. Lakovleva.1998. Status of global reservoirs: The position in the late twentieth century. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*: 3: 45-52.

Cala, P. 1995. Niveles tróficos de los peces más abundantes de la represa de Betania, alto río Magdalena, Colombia. *Acta Biológica Venezuelica* 16: 47-53

Childs, M. 2010. Literature survey: impacts of dams on river channel geomorphology. Departamento de Geografía. Universidad de Hull, Reino Unido. 31 pp.

De Fex, D. y L. F. Jiménez-Segura. 2011. Respuesta endocrina de *Prochilodus magdalenae* (Steindachner 1879) a cambios en el pulso de caudal en el río La Miel. Trabajo de grado. Universidad de Antioquia. 78 pp.

Empresas Públicas de Medellín EPM. 2014. Formulación de Planes de Ordenación Pesquera (POP) en los embalses de Porce II y Porce III. Desarrollo de acciones participativas para su implementación y manejo integral del recurso pesquero y acuícola. Informe Final. Fundación Humedales-EPM, Contrato CT-00087-2011. 38 pp.

Eschmeyer, W. y Fong. 2014. Catalog of fishes. http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp (fecha de consulta: 24 de septiembre de 2014).

Esguícero, A. L. H y M. S. Arcifa. 2010. Fragmentation of a neotropical migratory fishpopulation by a century-old dam. *Hydrobiologia* 638: 41-53.

Finer, M. y C.N. Jenkins. 2012. Proliferation of hydroelectric dams in the Andean Amazon and implications for Andes-Amazon connectivity. *PLoS ONE* 7(4): e35126. doi:10.1371/journal.pone.0035126.

Food and Agriculture Organization - FAO. 2014. Estado mundial de la pesca y la acuicultura 2014, oportunidades y desafíos. Organización de las Naciones Unidas para la Pesca y la Acuicultura. 253 pp.

Galvis, G. y J. I. Mojica. 2007. The Magdalena River freshwater fishes and fisheries. *Aquatic ecosystem health and Management* 10 (2): 127-139.

Gordon B. G. y R. K. Meentemeyer. 2006. Effectos of dam operation and land use on stream channel morphology and riparian vegetation. *Geomorphology* 83: 412-429.

Greathouse, E. A., C. M. Pringle y J. G. Holmquist. 2006. Conservation and management of migratory fauna: dams in tropical streams of Puerto Rico. *Aquatic conservation: Marine and freshwater ecosystems* 16: 695-712.

Hoeinghaus, D. J., A. A. Agostinho, L. C. Gomes, F. M. Pelicice, E. K. Okada, J. D. Latini, E. A. Kashiwaqui y K. O. Winemiller. 2009. Effects of river impoundment on ecosystem services of large tropical rivers: Embodied Energy and Market Value of Artisanal Fisheries. *Conservation Biology* 23 (5): 1222-1231.

Holt, B. G., J. P. Lessard, M. K. Borregaard, A. F. Fritz, M. B. Araújo, D. Dimitrov, P. H. Fabre, C. H. Graham, G. R. Graves, K. A. Jønsson, D. Nogués-Bravo, Z. Wang, R. J. Whittaker, J. Fjeldså y C. Rahbek. 2013. An Update of Wallace's Zoogeographic Regions of the World. *Science* 339: 74-77.

Jaramillo-Villa, U., J. A. Maldonado-Ocampo y F. Escobar. 2010. Altitudinal variation in fish assemblage diversity in streams of the central Andes of Colombia. *Journal of Fish Biology* 76: 2401–2417.

Jiménez-Segura, L. F. 2007. Ictioplancton y reproducción de los peces en la cuenca media del río Magdalena (sector de Puerto Berrio, Antioquia). Tesis doctoral, Universidad de Antioquia. 257 pp.

Jiménez-Segura, L. F., J. Palacio y R. Leite. 2010. River flooding and reproduction of migratory fish species in the Magdalena River basin, Colombia. *Ecology of Freshwater Fish* 19: 178-186.

Jiménez-Segura L. F., R. Álvarez-León, F. Gutiérrez-Bonilla, S. Hernández, M. Valderrama y F. Villa-navarro. 2011. La pesca y los recursos pesqueros en los embalses colombianos. Pp. 233-282. *En*: Lasso, C. A., F. de Paula Gutiérrez, M. A. Morales-Betancourt, E. Agudelo, H. Ramírez-Gil y R. E. Ajiaco-Martínez (Eds.). II. Pesquerías continentales de Colombia: cuencas del Magdalena- Cauca, Sinú, Canalete, Atrato, Orinoco, Amazonas y vertiente del Pacífico. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia.

Jiménez-Segura, L. F., A. Arango, M. I. Ríos y C. García-Alzate. 2013. Distribución altitudinal de la ictiofauna en un río transandino en el norte de Suramérica. *En*: Memorias del XII Congreso colombiano de ictiología y III Encuentro Suramericano de ictiólogos. Universidad Javeriana, ACICTIOS.

Jiménez-Segura, L. F., J. Maldonado-Ocampo y C. Pérez. 2014. Gradiente de recuperación longitudinal en la estructura de la ictiofauna en un río andino regulado. *Biota Colombiana* 15 (2): 61-80.

Ledec, G. y J. D. Quintero. 2003. Good and bad dams, environmental criteria for site selection of hydroelectric projects. Banco Mundial Región Latinoamérica y el Caribe. Sustainable Development Working Paper No. 16. 30 pp.

Lewis, W. M. 2008. Physical and chemical features of tropical Flowing waters. Pp. 1-21. *En*: Tropical Stream Ecology. Dudgeon D. (Eds.). Academic Press, London.

Liermann, R. C., C. Nilsson, J. Robertson e Y. Ng R. 2012. Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity. *BioScience* 62 (6): 539-548.

López-Casas, S., L. F. Jiménez-Segura, A. A. Agostinho, M. Petrere Jr. y C. Pérez. 2012. Flow Regulation and Fishery Catch in La Miel River (Magdalena Basin, Colombia). *En*: Proceedings of 9th International Symposium on Ecohydraulics. Julio 2012, Austria.

Lasso, C. A., F. de Paula Gutiérrez, M. A. Morales-Betancourt, E. Agudelo, H. Ramírez -Gil y R. E. Ajiaco-Martínez (Eds.). 2011. II. Pesquerías continentales de Colombia: cuencas del Magdalena-Cauca, Sinú, Canalete, Atrato, Orinoco, Amazonas y vertiente del Pacífico. Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de los Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., Colombia. 304 pp.

López-Casas, S., Jiménez-Segura L. F. y C. Pérez. 2014. Peces migratorios en la caverna de oscilación de una Central Hidroeléctrica: Caso Miel I (Caldas-Antioquia). *Biota Colombiana* 15 (Especial Embalses y ríos regulados): 28-41.

López-Casas, S., L. F. Jiménez-Segura, F. Villa-Navarro, C. Pérez, D. M. Gualtero-Leal y V. J. Angel-Rojas. 2013. Peces potádromos migratorios en la cuenca del río Magdalena. Pp. 22. *En*: Memorias del XII Congreso

Colombiano de Ictiología y III Encuentro Suramericano de Ictiólogos. Pontificia Universidad Javeriana, 52 pp.

Lundberg, J. G., L. G. Marshall, J. Guerrero, B. Horton, M. C. Malabarba y F. Wesselingh. 1998. The stage of the neotropical fish diversification: A history of tropical South American Rivers. Pp 13-48. *En*: Malabarba, L., R. Reis, R. Vari, Z. Lucena y C. Lucena (Eds.). Phylogeny and classification of neotropical fishes. EDIPUCRS. Porto Alegre, Brasil.

Maldonado-Ocampo, J., R. Vari y J. S. Usma. 2008. Checklist of the freshwater fishes in Colombia. *Biota Colombiana* 9: 143-237.

Pauly, D., V. Christensen, J. Dalsgaard, R. Froese y F. Torres Jr. 1994. Fishing Down Marine Food Webs. *Science* 279 (5352): 860-863.

Petts, G. E. 1980. Long-term consequences of upstream impoundment. *Environmental Conservation* 7: 325.

Petts, G. E. 1984. Impounded rivers: perspectives for ecological management. Chichester: John Wiley. 326 pp.

Makrakis M. C., L. E. Miranda, S. Makrakis, H. M. Fontes, J. W. G. Morlis, Dias J. H. P. y J. O. García. 2012. Diversity in migratory patterns among Neotropical fishes in a highly regulated river basin. *Journal of Fish Biology* 81: 866-881.

Maldonado, M., J. A. Maldonado-Ocampo, H. Ortega, A. C. Encalada, F. M. Carvajal-Vallejos, J. F. Rivadeeira, F. Acosta, D. Jacobsen, A. Crespo y C.A. Rivera-Rondón. 2012. Diversidad en los sistemas acuáticos. Pp. 325-347. *En*: Herzog S. K., R. Martínez, P. M. Jorgensen y H. Tiessen (Eds.). Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales. Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAJ), Sao José dos Campos y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE), Paris.

Margalef, R. 1983. Limnología. Ediciones Omega. Barcelona. 1010 pp.

Poff, N. L., J. D. Olden, D. M. Merritt y D. M. Pepin. 2007. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 5732–5737.

Restrepo, J. 2005. Los sistemas hídricos fluviales: visión general. Pp 21-51. *En*: Restrepo, J. (Ed). Los sedimentos del río Magdalena: reflejo de la crisis ambiental. Fondo Editorial. Universidad EAFIT, Medellín-Colombia. 267 pp.

Rodríguez-Olarte D., J. Mojica Corzo y D. Taphorn. 2011. Northern South America, Magdalena and Maracaibo Basins, Pp. 243-258. *En:* Albert J. y R. Reis (Eds.). Historical biogeography of Neotropical freshwater fishes. University of California Press, Ltda. London, England.

UPME - Unidad de Planeación Minero Energética. 2013. Plan de expansión de referencia Generación-Trasmisión 2013-2027. Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. 475 pp.

Usma-Oviedo S., F. Villa-Navarro, C. A. Lasso, F. Castro, P. T. Zuñiga, C. A. Cipamocha, A. Ortega-Lara, R. E. Ajiaco, H. Ramírez-Gil, L. F. Jiménez, J. Maldonado-Ocampo, J. A. Muñoz y J.T. Suarez. 2013. Peces dulceacuícolas migratorios. Pp 216-485. *En*: Zapata, I. A. y J. S. Usma (Eds). Guía de las especies migratorias de la biodiversidad en Colombia. Vol. 2 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. WWF-Colombia, Bogotá, D. C. Colombia. 486 pp.

Valderrama, M., S. Hernández y M. Pinilla. 2014. Análisis de estado de las pesquerías de la cuenca Magdalena–Cauca. *En*: The Nature Conservancy, Fundación Alma y Fundación Humedales (Eds). Guía para el manejo integrado de las planicies de inundación y el recurso pesquero en la macrocuenca Magdalena-Cauca. Bogotá, Colombia (*en prensa*).

Vörösmarty, C. J., M. Meybeck, B. Fekete, K. Sharma, P. Green y J. P. M. Syvitsky. 2003. Antropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Changes* 39: 169-190.

Winemiller, K. O., A. A. Agostinho y E. Pellegrini-Caramaschi. 2008. Fish Ecology in Tropical Streams. Pp. 107-146. *En*: Tropical StreamEcology. Dudgeon D. Eds. Academic Press, London.

Luz Fernanda Jiménez-Segura
Grupo de Ictiología
Instituto de Biología, Universidad de Antioquia
Medellín-Colombia
luz.jimenez@udea.edu.co

Daniel Restrepo-Santamaría D.
Grupo de Ictiología
Instituto de Biología, Universidad de Antioquia
Medellín-Colombia
dasanta24@gmail.com

Silvia López-Casas
Grupo de Ictiología
Instituto de Biología, Universidad de Antioquia
Medellín-Colombia
silvilopezcasas@yahoo.com

Juliana Delgado
The Nature Conservancy
Bogotá-Colombia
jdelgado@tnc.org

Mauricio Valderrama
Fundación Humedales
Bogotá-Colombia
mvalde@fundacionhumedales.org

Jonathan Álvarez
Grupo de Ictiología
Instituto de Biología, Universidad de Antioquia
Medellín-Colombia
jonalvarez04@gmail.com

Daniel Gómez
Grupo de Limnología y Biota Marina
Instituto de Biología, Universidad de Antioquia
Medellín-Colombia
dgomezgil88@gmail.com

Ictiofauna y desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca del río Magdalena - Cauca, Colombia

Cítese como: Jiménez-Segura, L. F., D. Restrepo-Santamaría, S. López-Casas, J. Delgado, M. Valderrama, J. Álvarez y D. Gómez. Ictiofauna y desarrollo del sector hidroeléctrico en la cuenca del río Magdalena - Cauca, Colombia. *Biota Colombiana* 15 (2): 3-25.

Recibido: 4 de agosto de 2014
Aprobado: 18 de diciembre de 2014