

REVISIÓN DE LA ANALÍTICA DE LA RELACIÓN ISOTÓPICA DE ESTRONCIO ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) COMO MARCADOR DE MIGRACIONES DE PECES EN LA CUENCA DEL PLATA

JUAN FRANCISCO FACETTI^{1*}, ESTEBAN AVIGLIANO²

*jfacetti@ing.una.py

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.

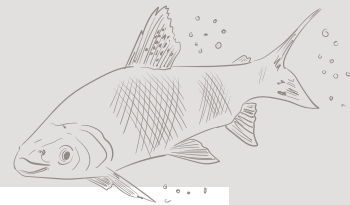
² CONICET-Universidad de Buenos Aires. Instituto de Investigaciones en Producción Animal (INPA), Facultad de Ciencias Veterinarias, Buenos Aires, Argentina.

RESUMO

La relación isotópica del estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) se ha afianzado como un marcador geoquímico natural para rastrear la migración de peces de agua dulce en grandes cuencas fluviales. En la cuenca del Río de la Plata, caracterizada por una geología variada, las aguas de distintos ríos y tributarios exhiben firmas isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diferentes. En estudios recientes y trabajos disponibles hasta 2026 se utilizó este método en especies de alto valor comercial, ecológico o de conservación, como el sábalo (*Prochilodus lineatus*), el dorado (*Salminus brasiliensis*), el patí (*Lucioperca pati*), el surubí pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*),

el Manguruyú (*Zungaro jahu*), el armado (*Oxydoras kneri*) y el bagre tres puntos (*Hemisorubim platyrhynchos*). Además, el enfoque se extendió a esturiones exóticos, como *Acipenser baerii* y *Acipenser gueldenstaedtii*, mediante el análisis de radios de aletas, y a bivalvos bioindicadores, como *Limnoperna fortunei*, para reconstruir la variación espacio-temporal de la señal isotópica del agua. En estas investigaciones, se definió un mapa isotópico del estroncio en la cuenca mediante el muestreo de aguas superficiales y se analizaron estructuras calcificadas de peces capturados en distintos sitios mediante espectrometría de masas con ablación láser. La relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ registrada en los otolitos mostró una estrecha correspondencia con la del

CITACIÓN RECOMENDADA Facetti J & Avigliano E (2025). Revisión de la analítica de la relación isotópica de estroncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) como marcador de migraciones de peces en la Cuenca del Plata. *Lucanus* – Revista de Ambiente e Sociedade, Volume IX, Páginas 104-131.



agua del sitio de captura, lo que confirmó que estas estructuras conservan un historial químico del ambiente recorrido por cada pez. El análisis de transectos desde el núcleo hasta el borde del otolito proporcionó nuevas perspectivas, sugiriendo migraciones transfronterizas, movimientos entre subcuencas y también patrones de residencia o conectividad a escalas más acotadas. La inclusión de otros marcadores geoquímicos, como Sr/Ca, complementó la información de los isótopos de Sr y mejoró la resolución para discriminar subcuencas con señales isotópicas semejantes. Los hallazgos aportan información relevante sobre el origen natal, el uso del hábitat, la conectividad y las áreas probables de desove o de cría/reclutamiento de peces neotropicales, con implicaciones directas

para la gestión pesquera. Se discuten las ventajas de aplicar $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en cuencas geológicamente complejas, así como las limitaciones del método y las futuras líneas de investigación orientadas a mejorar el trazado de movimientos en ecosistemas lóticos interrumpidos por represas o con líneas de base aún incompletas. Finalmente, el uso de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en estructuras calcificadas se presenta como una herramienta poderosa para comprender la conectividad ecológica en la Cuenca del Plata y fundamentar estrategias de conservación y manejo pesquero a escala regional.

PALAVRAS-CHAVE

Cuenca del Río de la Plata, mapa isotópico, migración ictícola, otolitos, relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, trazadores geoquímicos.

ABSTRACT

The strontium isotopic ratio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) has been consolidated as a natural geochemical marker for tracking freshwater fish migration in large river basins. In the Río de la Plata basin, characterized by varied geology, waters from different rivers and tributaries exhibit distinct $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic signatures. In recent studies and works available up to 2026, this method was applied to species of commercial, ecological, or conservation relevance, including streaked prochilod (*Prochilodus lineatus*), dorado (*Salminus brasiliensis*), patí (*Luciopimelodus pati*), spotted surubí (*Pseudoplatystoma corruscans*), Manguruyú (*Zungaro jahu*), armado (*Oxydoras kneri*), and three-spotted catfish (*Hemisorubim platyrhynchos*). The approach was also extended to non-native sturgeons, such as *Acipenser baerii* and *Acipenser gueldenstaedtii*, through fin-spine analysis, and to bioindicator bivalves such

as *Limnoperna fortunei* to reconstruct the spatio-temporal variability of water isotopic signals. In these studies, a strontium isotope map of the basin was developed through surface-water sampling, and calcified structures from fish captured at different sites were analyzed by laser-ablation mass spectrometry. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio recorded in otoliths showed a close correspondence with that of the capture-site water, confirming that these structures preserve a chemical record of the environmental history experienced by each fish. Core-to-edge transects provided new insights into transboundary migrations, movements among sub-basins, and also residence or connectivity patterns at shorter spatial scales. The inclusion of complementary geochemical markers, such as Sr/Ca, improved the discrimination of sub-basins with similar isotopic signatures. These findings provide relevant information on natal origin, habitat use,

connectivity, and probable spawning or nursery/recruitment areas of Neotropical fishes, with direct implications for fisheries management. The advantages and limitations of applying $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in geologically complex basins are discussed, along with future research directions aimed at improving

movement tracing in lotic ecosystems interrupted by dams or characterized by incomplete environmental baselines.

KEYWORDS

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic signature, fish migration, geochemical tracers, isoscape, otoliths, Río de la Plata basin, transboundary movement.

1 INTRODUCCIÓN

En sistemas fluviales extensos, la identificación de las rutas migratorias de los peces es fundamental para comprender su ecología e implementar medidas de gestión de la pesca adecuadas. Tradicionalmente, el estudio de las migraciones de peces potamódromos se ha basado en métodos como el marcado y recaptura, telemetría o seguimiento de agregaciones reproductivas. Sin embargo, estos enfoques resultan logísticamente difíciles de aplicar a gran escala espacial, especialmente en cuencas transfronterizas. En la última década, la geoquímica de los otolitos –estructuras calcificadas del oído interno de los peces– se ha afianzado como una alternativa eficaz para reconstruir la historia ambiental de los individuos. En particular, la relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ha emergido como un indicador natural muy robusto del origen natal y de los movimientos de los peces (Avigliano *et al.* 2020a). Esto se debe a que el estroncio presente en el carbonato cálcico del otolito proviene principalmente del medio ambiente acuático y su firma isotópica refleja directamente la de la columna de agua en la que vive el pez, sin sufrir un fraccionamiento biológico significativo. La relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el agua depende de la naturaleza y edad del lecho rocoso drenado; a medida que las rocas envejecen o son más ricas en Rubidio (^{87}Rb), el valor $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ tiende a aumentar. Así, cada sección transversal del otolito – desde el núcleo formado en la etapa larval hasta el borde depositado en edades avanzadas – actúa como un registro químico del agua ambiental en cada etapa de la vida del pez.

La eficacia del método isotópico depende de la existencia de variaciones geográficas en la composición isotópica del estroncio disuelto en las aguas

continentales. Dichas variaciones se deben a diferencias en la geología y la litología de las cuencas de drenaje. Las rocas difieren en su edad y en su relación Rb/Sr, por lo que presentan distintas razones isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Esto se debe a que el ^{87}Sr aumenta progresivamente debido a la desintegración radiactiva del ^{87}Rb a lo largo del tiempo geológico, mientras que el ^{86}Sr es un isótopo estable y no radiogénico. Como consecuencia, el estroncio liberado durante la meteorización conserva la firma isotópica característica de cada unidad geológica, lo que origina diferencias en la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre ríos que drenan formaciones geológicas contrastantes. En consecuencia, ríos que fluyen sobre formaciones geológicas contrastantes pueden presentar valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ claramente diferenciados. La cuenca del Río de la Plata (que abarca los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay, así como el estuario del Plata, entre otros) constituye un ejemplo paradigmático de una cuenca geológicamente heterogénea en la que el enfoque isotópico ofrece ventajas. Estudios recientes han demostrado que esta cuenca presenta un mosaico espacial de razones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el agua, con gradientes marcados a escala regional Avigliano *et al.* (2020a). Por ejemplo, a lo largo del eje Paraguay-Paraná se observa un gradiente latitudinal donde $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ disminuye desde ~ 0.7230 en cabeceras del Alto Paraguay hasta ~ 0.7106 en el tramo inferior del Paraná, mientras que en el río Uruguay la tendencia es inversa, aumentando desde ~ 0.7077 en tributarios de la cuenca alta hasta ~ 0.7122 en la cuenca baja (Fig.1). En el estuario del Río de la Plata, dominado por sedimentos pampeanos recientes, se registran las firmas isotópicas más bajas (~ 0.7083 – 0.7095). Estas diferencias reflejan las distintas provincias geológicas de la cuenca – por ejemplo, rocas precámbricas del macizo brasileño en el Alto Paraguay con ^{87}Sr radiogénico elevado, frente a depósitos cuaternarios en el estuario con ^{87}Sr más bajo – y permiten delimitar regiones hidrogeográficas basadas en la geoquímica de sus aguas (Avigliano *et al.* 2020a).

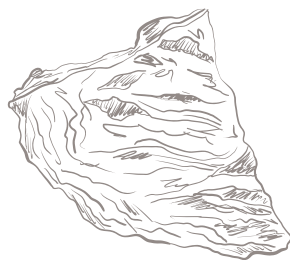
El aprovechamiento de la huella isotópica del estroncio en las aguas para rastrear peces es especialmente prometedor en la Cuenca del Plata, dado que alberga especies migratorias y de interés ecológico, pesquero o de conservación cuya dinámica espacial aún no está completamente resuelta. Entre ellas se encuentran el sábalo (*Prochilodus lineatus*), el dorado (*Salminus brasiliensis*), el patí (*Luciopimelodus pati*), el surubí pintado (*Pseudoplatystoma corruscans*), el Manguruyú (*Zungaro jahu*), el armado (*Oxydoras kneri*) y el bagre tres puntos (*Hemisorubim platyrhynchos*). A este conjunto se suman casos no nativos o emergentes, como los esturiones siberiano y ruso (*Acipenser baerii* y *Acipenser gueldenstaedtii*), cuyo origen y dispersión se evaluaron mediante el análisis de los radios de las aletas. En conjunto, estos ejemplos muestran que la aplicación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ y de marcadores complementarios no se restringe a unas pocas especies emblemáticas, sino que permite abordar preguntas sobre el origen natal, la conectividad, el uso del hábitat, la fragmentación y el manejo en escalas muy diferentes.

En este contexto, los estudios publicados hasta 2026, permiten revisar la aplicación de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en la Cuenca del Plata desde una perspectiva más amplia que la del primer mapa isotópico. El artículo sintetiza: (1) el fundamento geoquímico del marcador; (2) la construcción de líneas de base de agua en Paraná, Paraguay, Uruguay, Bermejo, Pilcomayo, Río de la Plata, esteros del Iberá, cuenca del Carcarañá, parte del Pantanal y sectores del gradiente Yungas-Chaco; (3) la correspondencia entre agua y estructuras calcificadas; (4) los casos de sábalo, dorado, patí, surubí, Manguruyú, armado, bagre tres puntos y esturiones; (5) el aporte de Sr/Ca para resolver zonas isotópicamente semejantes; y (6) el uso de bivalvos como archivos ambientales de la variación hidrogeoquímica.

2 METODOLOGÍA

2.1. CONFIGURACIÓN HIDROLÓGICA Y GEOLÓGICA

La cuenca del Río de la Plata se compone de seis subcuencas principales: Paraná, Paraguay, Bermejo, Pilcomayo, Uruguay y el estuario del Río de la Plata. La cuenca presenta una gran diversidad de ambientes, desde los Andes hasta el Bosque Atlántico Paranaense. La geología de la cuenca es marcadamente heterogénea. La cuenca superior del Paraná se sustenta principalmente en basaltos toleíticos Jurásico-Cretácicos (Provincia Ígnea de Paraná-Etendeka). Los ríos Pilcomayo y Bermejo drenan rocas sedimentarias andinas antiguas. Los ríos de la llanura del Paraguay y el Paraná inferior están cubiertos por depósitos más recientes (Figura 1).



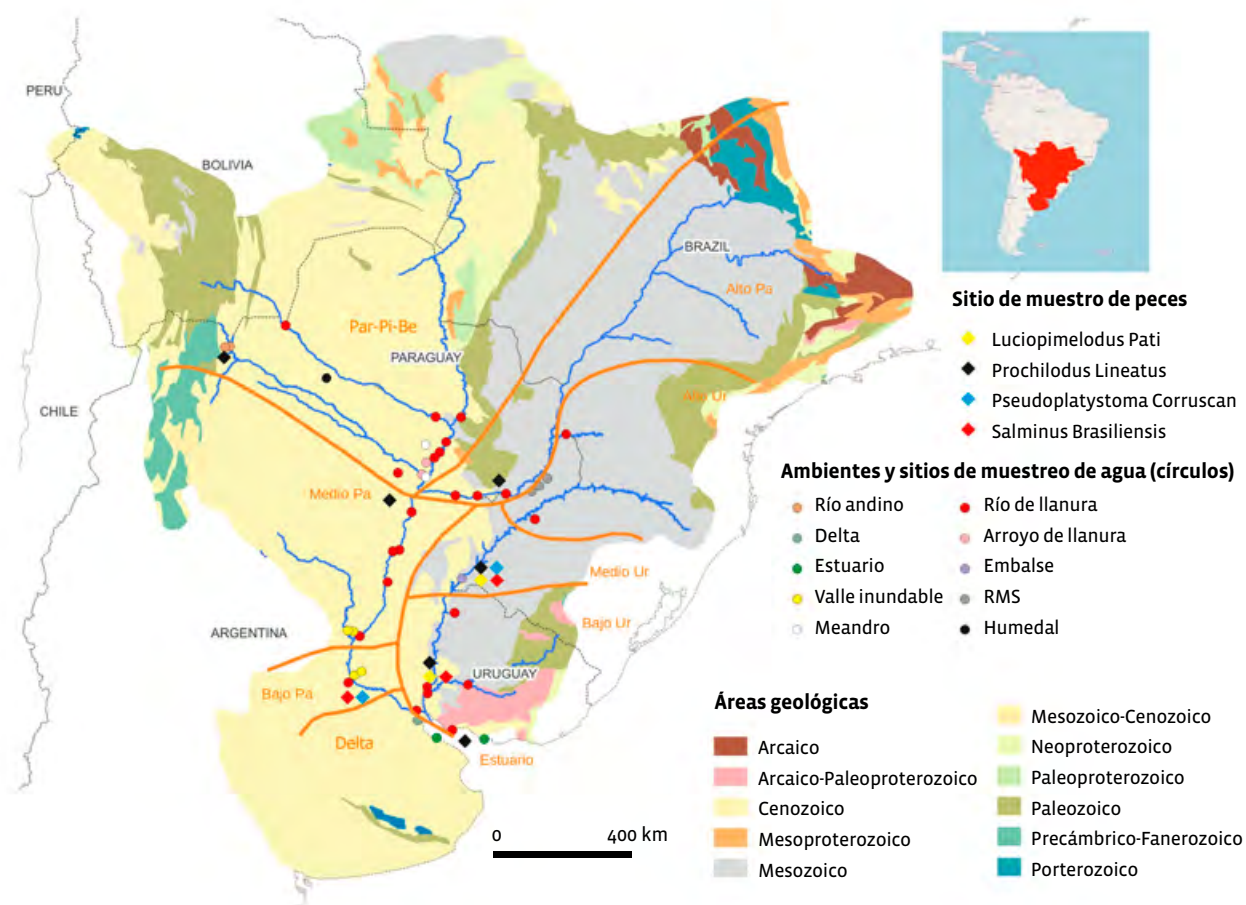


FIGURA 1 Mapa de ubicación de la Cuenca del Río de la Plata y sitios de estudio (Modificado de Avigliano et al. (2020a)).

“

La cuenca del Río de la Plata se compone de seis subcuencas principales: Paraná, Paraguay, Bermejo, Pilcomayo, Uruguay y el estuario del Río de la Plata. La cuenca presenta una gran diversidad de ambientes, desde los Andes hasta el Bosque Atlántico Paranaense.”

2.2. DISEÑO GENERAL Y MUESTREO AMBIENTAL

Los estudios revisados combinaron muestreos geoquímicos del agua con análisis microquímicos de estructuras calcificadas. La línea base inicial incluyó 43 sitios de agua en las principales subcuencas y fue ampliada posteriormente con nuevos sectores de interés: efluentes del Iberá, Carcarañá, alto Bermejo, puntos próximos a la Confluencia Paraná-Paraguay y tributarios del Pantanal. Esta ampliación es relevante porque algunas zonas presentan señales de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ parcialmente superpuestas o variación hidrológica estacional, lo que puede dificultar la asignación de origen si se usa un único marcador.

2.3. MUESTREO DE PECES Y PREPARACIÓN DE OTOLITOS

En paralelo al muestreo ambiental se analizaron peces y estructuras calcificadas de diferentes especies. Los primeros trabajos incluyeron sábalo, dorado, patí y surubí, mientras que estudios posteriores ampliaron el enfoque a dorado en el Carcarañá, Manguruyú en el eje Paraná-Paraguay/Pantanal, armado y bagre en tres puntos del alto Paraná, y sábalo y dorado en el sistema Río del Valle-Bermejito. En la mayoría de los casos se emplearon otolitos, pero los esturiones exóticos se evaluaron mediante radios de aletas, lo que muestra la utilidad de estructuras alternativas cuando los otolitos no son la matriz más adecuada o cuando interesa explorar métodos menos letales.



Los estudios revisados combinaron muestreos geoquímicos del agua con análisis microquímicos de estructuras calcificadas.”

2.4. ANÁLISIS MICROQUÍMICO DE OTOLITOS

La determinación de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a lo largo del otolito se realizó mediante espectrometría de masas con ablación láser acoplada a multicolelector (LA-MC-ICP-MS). Este enfoque permite muestrear la composición química desde el núcleo hasta el borde y reconstruir la historia ambiental del pez durante la ontogenia. No obstante, debe distinguirse entre el tamaño nominal del spot o del haz de ablación y la resolución espacial efectiva del perfil. Aunque se utilicen spots o transectas de 20, 50, 80 o 100 micrómetros, esa dimensión no equivale necesariamente a la resolución lateral cuando los puntos se superponen o cuando el análisis se realiza en modo transecta. En diseños finos, la resolución efectiva puede ser inferior al diámetro del spot, incluso inferior a 5 micrómetros, dependiendo del solapamiento, la velocidad de barrido, la frecuencia del láser, el crecimiento del otolito y el procesamiento de la señal. Por ello, la interpretación temporal debe hacerse caso por caso y no traducir mecánicamente el tamaño del spot a semanas o meses sin una validación de crecimiento.

Además de la composición isotópica del Sr, algunos estudios midieron simultáneamente las concentraciones de elementos traza en los otolitos, en particular las relaciones Sr/Ca y Ba/Ca. Esto se logra con la misma técnica de ablación láser acoplada a un espectrómetro de masas (en este caso, un ICP-MS de cuadrupolo para elementos traza). La cuantificación de Sr/Ca (y Ba/Ca) en los mismos transectos proporciona información complementaria, ya que estos cocientes reflejan la concentración relativa de Sr y Ba respecto de Ca en el agua, la cual puede estar vinculada a factores como la salinidad, la dureza del agua o el aporte de aguas subterráneas. Por ejemplo, valores elevados de Sr/Ca en otolitos de peces de agua dulce suelen asociarse a incursiones en ambientes con mayor contenido salino o mineral (dado que el Sr es típicamente más abundante en aguas salobres), mientras que Ba/Ca puede aumentar en zonas con aguas de inundación o con ciertos tipos de suelo. Avigliano *et al.* (2021) evaluaron explícitamente la utilidad de Sr/Ca y Ba/Ca como trazadores adicionales a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el sábalo, obteniendo, mediante perfilado por LA-ICP-MS, ambos tipos de datos (isotópicos y elementales) de los otolitos.

2.5. ANÁLISIS DE DATOS Y ASIGNACIÓN DE PROCEDENCIAS

Una vez obtenidos los datos químicos, el siguiente paso fue comparar las firmas isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ medidas en otolitos con la línea base isotópica del agua de la región. Para ello, se construyeron bases de datos georreferenciadas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del agua (incluyendo valores propios medidos y datos recopilados de la literatura cuando estaban disponibles) (Avigliano *et al.* 2021). Avigliano *et al.* (2020a) reportaron que muchas masas de agua presentaban valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ significativamente diferentes entre sí ($p < 0.05$), estableciendo así “firmas” características por subcuenca. Mediante análisis estadísticos multivariados, como análisis de clusters, se agruparon los sitios de agua en regiones isotópicamente homogéneas; por ejemplo, en el estudio del dorado se identificaron diferentes agrupaciones o firmas isotópicas diferenciables en la cuenca (Avigliano *et al.* 2023). Con estas regiones definidas, se procedió a asignar el origen natal de cada pez analizando el valor de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en la porción nuclear de su otolito (que se forma en el sitio de nacimiento/primer cría). Si el valor del núcleo coincidía con el rango isotópico de una región geográfica, se infería que el pez nació en dicha subcuenca. Para formalizar estas asignaciones, se aplicaron métodos de clasificación estadística: Avigliano *et al.* (2020a) utilizaron un análisis discriminante lineal basado en la química del núcleo del otolito, logrando discriminar orígenes de peces entre distintas subcuencas. De forma complementaria, se inspeccionaron los perfiles longitudinales de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en cada otolito para identificar cambios abruptos o tramos distintos, los cuales indicarían movimientos entre ambientes con firmas isotópicas diferentes a lo largo de la vida del pez. Estos cambios se interpretaban en función de los valores de referencia del agua: por ejemplo, un aumento súbito de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el otolito podría señalar la entrada del pez en un río de aguas más radiogénicas (p. ej., provenientes de rocas antiguas), mientras que una disminución prolongada podría reflejar la migración hacia aguas con menor $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (p. ej., tramos inferiores cercanos al estuario).

En cuanto al uso de los cocientes Sr/Ca y Ba/Ca, la metodología consistió en comparar los valores medidos en los otolitos (particularmente en el borde del otolito, correspondiente al sitio de captura) con los valores de Sr/Ca y Ba/Ca característicos del agua de cada río muestreado. Avigliano *et al.* (2021) calcularon la correlación entre el Sr/Ca del agua y el del borde del otolito de sábalo para evaluar cuantitativamente su correspondencia. Asimismo, emplearon análisis discriminantes con conjuntos de variables que incluían $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, Sr/Ca y Ba/Ca del agua para evaluar en qué medida mejoraba la clasificación de los ambientes en comparación con usar solo $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

2.6. CONTEXTO DE RÍOS FRAGMENTADOS

Un aspecto particular del diseño experimental de Avigliano *et al.* (2023) fue investigar el caso de un tributario semi-fragmentado por represas (el río Carcarañá, en la provincia de Santa Fe, Argentina) comparado con un tramo libre de represas (Alto Paraná en Misiones, Argentina) en relación al movimiento de dorados. En este estudio, además de identificar orígenes y movimientos, se buscó inferir si los dorados eran capaces de superar las estructuras transversales (pequeños diques con vertederos) presentes en el Carcarañá para acceder a zonas de reproducción río arriba. La metodología isotópica fue esencialmente la misma (análisis de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en agua y otolitos), pero la interpretación de los perfiles de otolitos se realizó considerando la ubicación de represas conocidas en la cuenca. Por ejemplo, si un dorado capturado aguas arriba de una represa mostraba en su otolito señales de haber residido previamente en aguas con la firma isotópica del Paraná inferior (aguas abajo de la represa), se deduce que logró migrar atravesando la barrera. En síntesis, la metodología integró levantamientos geoquímicos ambientales y análisis microquímicos de otolitos, apoyados en herramientas estadísticas de clasificación, para vincular los registros isotópicos de los peces con la geografía de la cuenca. Este planteo permitió rastrear las migraciones de los peces de forma retrospectiva, abarcando potencialmente toda su vida, lo cual sería inviable con métodos convencionales de marcaje. A continuación, se describen los resultados principales obtenidos con esta aproximación para las especies estudiadas.



En este estudio, además de identificar orígenes y movimientos, se buscó inferir si los dorados eran capaces de superar las estructuras transversales (pequeños diques con vertederos) presentes en el Carcarañá para acceder a zonas de reproducción río arriba.”

3 RESULTADOS

3.1. VARIABILIDAD ISOTÓPICA EN LAS AGUAS DE LA CUENCA DEL PLATA

Las mediciones de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en las aguas superficiales confirmaron una marcada heterogeneidad espacial, acorde con las diferencias geológicas entre las subcuencas. Se observaron rangos de valores distintos en cada uno de los grandes ríos. Por ejemplo, el río Paraguay (y Alto Paraná) presentó las razones más elevadas (~ 0.720 – 0.723 en cabeceras), mientras que el río Uruguay exhibió valores menores (en el entorno de 0.708 – 0.712) y el estuario del Plata los más bajos (~ 0.7083 – 0.7095). En el río Paraná, los valores tendieron a disminuir desde el tramo superior hasta el inferior (p. ej., ~ 0.713 – 0.714 en Paraná medio vs. ~ 0.710 – 0.711 en Paraná inferior). Estas variaciones permiten definir *firmas isotópicas* características por región y diferencias estadísticamente significativas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre múltiples cuerpos de agua muestreados ($p < 0.05$). Mediante un análisis de clúster sobre los datos de agua ampliados, identificaron hasta nueve grupos o señales isotópicas diferenciables en la cuenca, coherentes con compartimentos hidrogeológicos. Un análisis discriminante sobre la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del agua confirmó la existencia de por lo menos ocho señales contrastantes, suficientes para distinguir entre las principales subcuencas del sistema. En resumen, el mapeo isotópico construyó un marco de referencia en el que cada gran región (Alto Paraná, Bajo Paraná, Alto Uruguay, etc.) posee un rango distintivo de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Figura 2).



Mediante un análisis de clúster sobre los datos de agua ampliados, identificaron hasta nueve grupos o señales isotópicas diferenciables en la cuenca, coherentes con compartimentos hidrogeológicos.”



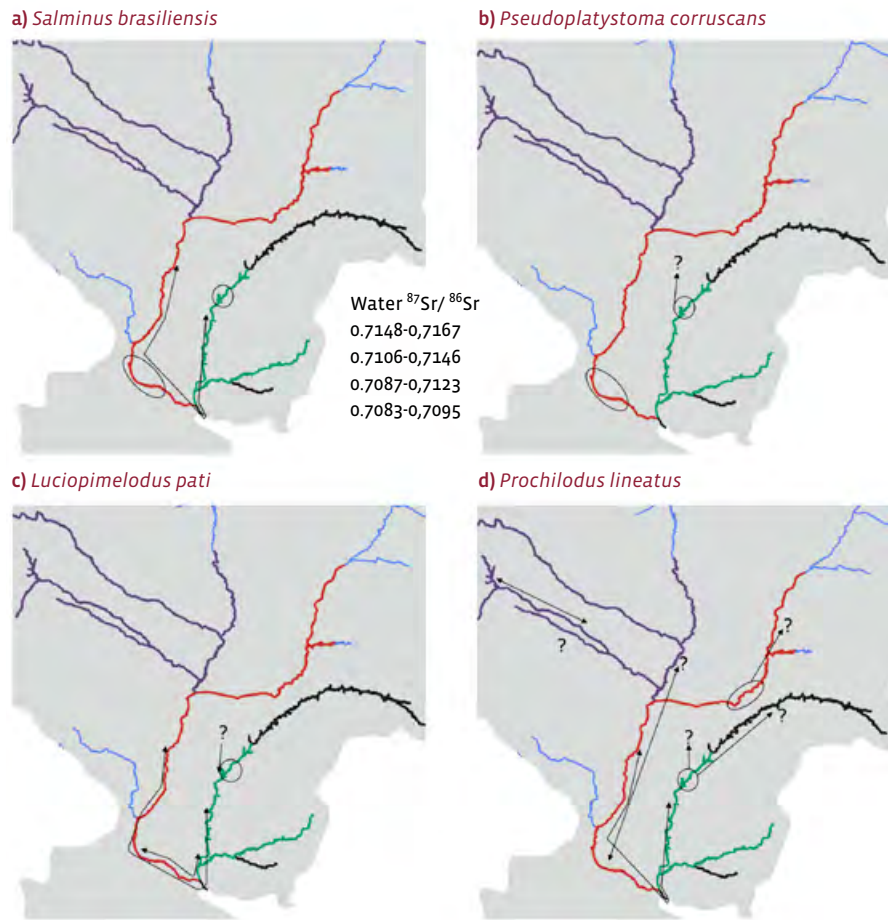


FIGURA 2 Los mapas muestran los patrones de desplazamiento e historias de vida inferidos para cuatro especies clave: (a) *Salminus brasiliensis*, (b) *Pseudoplatystoma corruscans*, (c) *Luciopimelodus pati* y (d) *Prochilodus lineatus*. Los diferentes colores en los cursos de agua representan los rangos característicos de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el agua (desde los valores más bajos, en negro/verde, hasta los más altos, en rojo/azul). Las flechas, elipses y signos de interrogación detallan las rutas migratorias estimadas, las zonas de conectividad y las áreas de incertidumbre identificadas mediante el análisis microquímico de las especies en relación con la línea base ambiental (Modificado de Avigliano et al. (2020a)).

3.2. CORRESPONDENCIA ENTRE FIRMAS DEL AGUA Y DE OTOLITOS

Un hallazgo crucial fue comprobar que los otolitos de los peces reflejan fielmente la composición isotópica del ambiente acuático en el que viven (Figura 3). Al comparar el valor de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en el borde de los otolitos (correspondiente al lugar de captura) con el valor medido en el agua de ese mismo sitio, se encontró una relación prácticamente 1:1. Esto indica que

no hay fraccionamiento apreciable ni *offset* fisiológico entre el estroncio incorporado al otolito y el disuelto en el agua circundante: ambos valores coinciden dentro de los errores analíticos. Avigliano *et al.* (2020a) reportaron explícitamente esta relación uno a uno entre $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del borde del otolito y del agua para todas las especies analizadas, reforzando la validez del uso de la relación isotópica como trazador directo de procedencia ambiental. De manera similar, en el caso del cociente elemento/Ca, se halló una fuerte correlación lineal entre el Sr/Ca del agua y el Sr/Ca registrado en el otolito del sábalo en el sitio de captura ($R^2 = 0.94$, $p < 0.05$). Esta relación indica que las variaciones en la concentración de Sr entre distintos ríos también se reflejan en la química del otolito, aunque en este caso pueden existir ligeras diferencias de pendiente atribuibles a factores biológicos o ambientales adicionales (por ejemplo, temperatura, crecimiento; ver Discusión). En cambio, para el cociente Ba/Ca no se encontró una correspondencia significativa agua-otolito en el sábalo, lo cual sugiere que el bario podría estar más influido por procesos fisiológicos o que sus gradientes ambientales no eran tan marcados ni tan constantes estacionalmente como los del Sr en la cuenca estudiada.

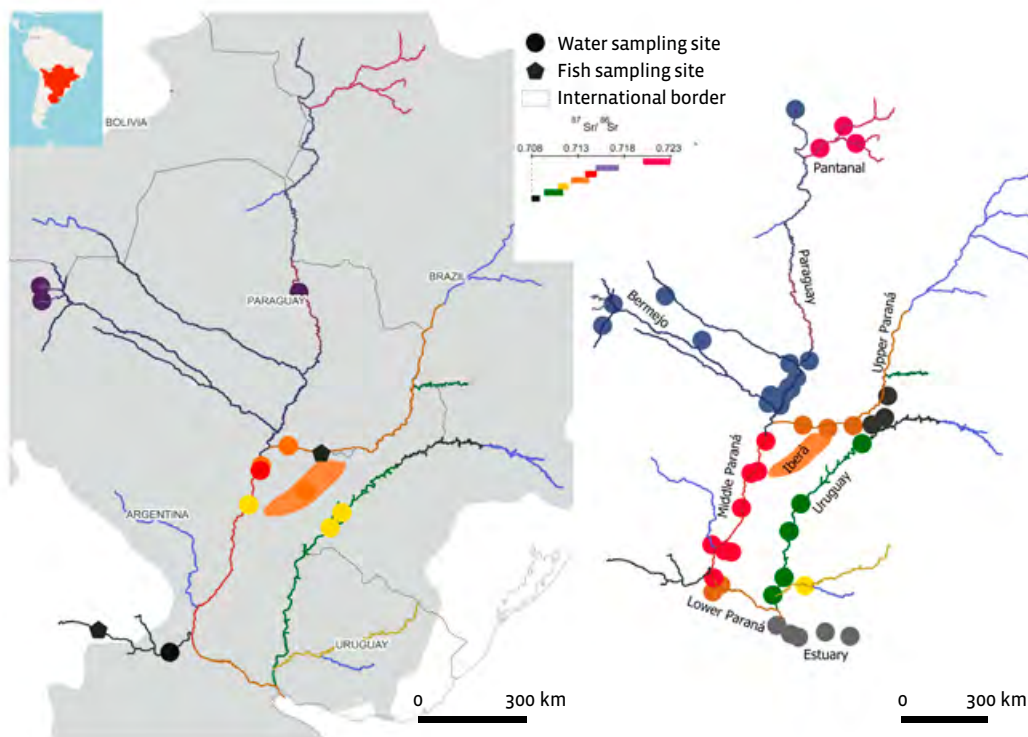


FIGURA 3 Distribución de los sitios de muestreo de agua y peces utilizados para la validación de la relación agua-otolito en la Cuenca del Río de la Plata. Los puntos de colecta de agua (círculos) y de captura de peces (pentágonos) empleados para comprobar la relación directa entre el ambiente y el registro químico en los otolitos. Los diferentes colores en la red de drenaje representan los rangos de la firma isotópica del agua, los cuales se reflejan fielmente y sin fraccionamiento en el borde de los otolitos de las especies analizadas en sus respectivos sitios de captura (Modificado de Avigliano *et al.* (2023)).

3.3. ORIGEN NATAL Y DESPLAZAMIENTOS DE LARGA DISTANCIA

El análisis de la composición isotópica de los núcleos de otolitos reveló que muchos peces eran originarios de subcuencas distintas de las donde fueron capturados. En otras palabras, se detectaron migraciones desde áreas de desove/cría hacia zonas de crecimiento o de alimentación más alejadas. El análisis discriminante basado en $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del núcleo de los otolitos clasificó con éxito a los individuos de sábalo, dorado, patí y surubí según la región isotópica de origen, lo que indica que la mayoría no era originaria del sitio de muestreo. Por ejemplo, Avigliano *et al.* hallaron que los cuatro surubíes analizados en el Alto Paraná presentaban valores de núcleo correspondientes a la cuenca del Paraguay, sugiriendo un origen en tributarios de ese sistema, mientras que otros individuos de las distintas especies tenían núcleos coincidentes con señales de subcuencas distantes. En un estudio de 2023, enfocado en dorado, cuatro ejemplares del Alto Paraná mostraron firmas de núcleo asignables a la cuenca del Paraguay (río Paraguay o Alto Paraná paraguayo), mientras que el resto correspondía al propio Paraná. A su vez, todos los dorados capturados en la cuenca del Carcarañá (tributario del Paraná inferior) exhibieron núcleos que los clasificaban como originarios del río Paraná, excepto dos individuos cuya señal indicaba origen autóctono del Carcarañá. Estos resultados aportan evidencia concreta de movimientos icticos a gran escala: peces nacidos en ciertos tributarios o en tramos altos migran luego a lo largo de cientos de kilómetros hasta otras regiones de la cuenca, donde son capturados.

En particular, se documentaron migraciones de extraordinaria longitud en varias de las especies estudiadas. Avigliano *et al.* 2020a reportaron en “migraciones transfronterizas” superiores a 1000 km en el sábalo, dorado y patí. Por ejemplo, algunos individuos de sábalo analizados presentaron un núcleo de otolito con $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ típico de la cuenca alta del Paraná (e.g., en territorio brasileño o paraguayo) mientras que fueron capturados en el tramo inferior del Paraná en Argentina, implicando un desplazamiento río abajo de más de mil kilómetros a lo largo de su vida. De modo inverso, se infirieron movimientos río arriba: ciertos patíes y dorados capturados en el bajo Paraná mostraron núcleos compatibles con el Alto Paraná o incluso con la cuenca del río Uruguay, lo que sugiere migraciones ascendentes de gran escala que atraviesan el Delta del Paraná para conectar ambas cuencas. De hecho, la utilización del Delta y el estuario del Río de la Plata como corredor natural quedó evidenciada por peces cuya trayectoria isotópica indica que pasaron del río Paraná al río Uruguay o viceversa durante su vida. Este hallazgo es notable, ya que implica un intercambio biológico entre dos grandes

ríos que actualmente delimitan fronteras internacionales (Argentina, Uruguay, Paraguay y Brasil), lo que subraya la necesidad de enfoques de manejo transfronterizo (ver Discusión). En otras especies analizadas como *Zungaro jahu*, los perfiles de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ indicaron un uso concentrado alrededor de la confluencia Paraná-Paraguay y no apoyaron una migración extensa hacia todo el Pantanal o el bajo sistema. En *Oxydoras kneri* y *Hemisorubim platyrhynchos*, la señal isotópica reveló movimientos de corta y media escala entre los sectores del Paraná y del Paraguay, con posibles contribuciones de distintas áreas de origen. En los esturiones *Acipenser baerii* y *Acipenser gueldenstaedtii*, los radios de las aletas permitieron inferir un origen compatible con zonas de cultivo en la cuenca del Uruguay/Río Negro y movimientos posteriores hacia el Paraná. En conjunto, estos casos amplían el alcance del enfoque hacia problemas de conectividad, manejo y dispersión que operan en escalas espaciales y taxonómicas diferentes.

3.4. TRÁNSITO EN AMBIENTES DIVERSOS A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA

Más allá de la distancia recorrida, los perfiles de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en los otolitos revelaron que las especies estudiadas habitan una variedad de ambientes acuáticos a lo largo de su ontogenia. Avigliano *et al.* observaron en 2020a cambios en las razones isotópicas en otolitos individuales que corresponden al tránsito por diferentes tipos de hábitats. Por ejemplo, se identificaron tramos de crecimiento del otolito con valores estables de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, seguidos de transiciones bruscas a un nuevo valor estable, lo que indica estadias prolongadas en un ambiente y luego la migración a otro con una firma geoquímica distinta. La interpretación combinada de estos patrones sugiere que los peces recorren secuencialmente ambientes tales como: **i)** ríos de llanura (aguas con $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ intermedio, Sr/Ca moderado), **ii)** arroyos o ríos de piedemonte/montaña (aguas a menudo más radiogénicas por provenir de sustratos antiguos, a la par que con Sr/Ca menor si son de baja mineralización), **iii)** valles de inundación y humedales (posiblemente reflejados por variaciones en Ba/Ca en algunos casos, aunque no tan evidentes isotópicamente), **iv)** embalses o tramos bajo influencia de represas (que pueden retener sedimentos y alterar la química, a veces homogenizando la señal aguas abajo), y **v)** el ambiente *estuarino* del Río de la Plata (el cual tiene la firma de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ más baja de la cuenca y un Sr/Ca elevado debido a la intrusión salina y mayor contenido de solutos) (Figura 4). De hecho, los perfiles de otolito en sábalo y patí sugieren que algunos individuos incursionan en

el estuario durante sus fases juvenil o reproductiva, lo cual coincide con observaciones de campo de estas especies tolerando condiciones mesohalinas. En conjunto, los registros isotópicos otolíticos delinearon por primera vez un uso del hábitat sumamente complejo en los peces de la Cuenca del Plata, donde no todos los individuos siguen un único patrón de migración, sino que existe plasticidad y múltiples rutas posibles hacia distintos entornos. Esta variedad de estrategias (p. ej., algunos patíes reclutados en tributarios andinos frente a otros en planicies, o dorados que se reproducen en ríos secundarios además de los cauces troncales) tiene importantes implicaciones para su conservación.



FIGURA 4 Diversidad de ambientes y paisajes en el área de estudio. Esta composición ilustra la gran variedad de ecosistemas presentes en la cuenca, desde las cabeceras montañosas hasta su desembocadura en el océano. Se detallan las siguientes condiciones y sitios de estudio: (a) el Alto Río Paraná; (b) el Alto Río Uruguay con rápidos poco profundos y lecho rocoso; (c) el río Pilaya, un tributario andino y árido del Pilcomayo en Bolivia; (d) el río Curupí con su vegetación ribereña; (e) el Paraná Medio, mostrando embarcaciones pesqueras artesanales en la costa; (f) el humedal Bañado la Estrella (río Pilcomayo, Formosa), caracterizado por sus árboles secos y vegetación flotante; (g) la pesca con redes en las aguas someras y amplias del estuario del Río de la Plata; (h) el delta del Paraná, conformado por un mosaico de canales de agua e islas con abundante vegetación flotante; (i) cataratas del Iguazú, mostrando el impresionante salto de agua; y (j) El río Popayán en el Alto Bermejo.







3.5. APOORTE DEL COCIENTE SR/CA Y OTROS MARCADORES

La incorporación de la relación Sr/Ca junto con la razón $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ permitió aumentar significativamente la resolución espacial de los estudios de procedencia y migración, particularmente en sectores de la cuenca donde distintos ríos presentan valores similares de $87\text{Sr}/86\text{Sr}$. En el sábalo (*Prochilodus lineatus*), la combinación de $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ con Sr/Ca y, en menor medida, Ba/Ca incrementó la capacidad de asignación de individuos a sus ríos de origen, elevando la tasa de clasificación correcta desde aproximadamente 58 % utilizando únicamente $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ hasta 92,5 % al integrar los marcadores geoquímicos en un modelo discriminante (Avigliano *et al.* 2021). En algunos sectores de la cuenca, la clasificación alcanzó el 100 %, lo que demuestra que la incorporación de elementos traza permite discriminar ambientes geológicamente similares que no pueden diferenciarse únicamente mediante isótopos de Sr. Este comportamiento fue particularmente evidente en regiones donde el Alto Paraná, el Alto Paraguay y otros tributarios presentan firmas isotópicas semejantes, pero difieren en sus relaciones Sr/Ca del agua. En estos casos, el Sr/Ca registrado en el borde de los otolitos mostró una elevada correspondencia con el Sr/Ca del ambiente ($R^2 \approx 0,94$), lo que confirma su utilidad como indicador de los movimientos ocurridos durante los últimos meses de vida del pez. Por el contrario, la relación Ba/Ca mostró una asociación más débil entre el agua y los otolitos y aportó escasa información adicional para reconstruir los movimientos en esta cuenca (Avigliano *et al.* 2021). En conjunto, la integración de isótopos radiogénicos con elementos traza permitió construir una huella geoquímica más robusta de

cada ambiente, lo que aumentó considerablemente el poder de resolución de los estudios de conectividad y migración.

Si bien los otolitos constituyen la estructura calcificada más utilizada debido a su crecimiento continuo y naturaleza metabólicamente inerte, diferentes estudios han demostrado que otras estructuras también pueden registrar información geoquímica útil para reconstruir historias de vida. En particular, las espinas de peces han surgido como una alternativa especialmente valiosa para especies amenazadas o de alto valor para la conservación, ya que permiten realizar muestreos no letales. En *Genidens barbatus*, especie catádruma catalogada como vulnerable, la composición elemental de las espinas dorsales permitió discriminar poblaciones del Atlántico sudoccidental, con tasas de clasificación de hasta 96 %, cuando se combinaron elementos traza (Li/Ca, Na/Ca, Pb/Ca y Zn/Ca) con Sr/Ca, Ba/Ca, Mg/Ca y Mn/Ca, lo que demuestra que estas estructuras conservan un registro geoquímico suficientemente estable para estudios de estructura poblacional y uso de hábitat (Avigliano et al. 2020b).

De manera similar, el análisis de perfiles de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en espinas pectorales permitió reconstruir el origen natal y los desplazamientos de esturiones siberiano (*Acipenser baerii*) y ruso (*A. gueldenstaedtii*) introducidos en la Cuenca del Plata. Los perfiles isotópicos indicaron un origen compatible con establecimientos de acuicultura ubicados en la cuenca del río Uruguay y permitieron identificar migraciones posteriores hacia el río Paraná, lo que demuestra que las espinas pueden registrar cambios de hábitat de forma comparable a los otolitos (Avigliano et al. 2023). Estos resultados amplían el uso de estructuras calcificadas alternativas para especies en las que la extracción de otolitos no es posible o resulta indeseable, ya sea por tratarse de especies amenazadas, de alto valor económico o ejemplares provenientes de colecciones científicas, constituyendo una herramienta promisoría para estudios de conectividad, dispersión y manejo de peces. (Avigliano et al. 2023).

3.6. CASO DE ESTUDIO – MIGRACIÓN EN RÍO SEMI-FRAGMENTADO

El caso del dorado en el río Carcarañá mostró cómo la combinación de línea base de agua y perfiles de otolitos puede evaluar conectividad en tributarios semi-fragmentados. Los perfiles de *Salminus brasiliensis* indicaron que muchos individuos capturados en el Carcarañá tenían origen compatible con el Paraná y que algunos fueron capaces de superar hasta tres

vertederos abiertos, permaneciendo luego durante años en el tributario e incluso reproduciéndose allí. Al mismo tiempo, el Paraná siguió siendo la fuente principal de reclutas, por lo que la conectividad con el río mayor parece clave para sostener esas poblaciones locales. Este caso también justificó ampliar la línea base hacia Iberá, Carcarañá y alto Bermejo, sectores que no estaban suficientemente caracterizados en el mapa inicial.

4 DISCUSIÓN

4.1. VENTAJAS DEL TRAZADOR $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ EN CUENCAS HETEROGÉNEAS

Los resultados resumidos confirman que la relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ es un excelente *marcador natural* de los movimientos de los peces en la Cuenca del Plata. Dado que los otolitos registran fielmente el valor isotópico del agua ambiente sin fraccionamiento, es posible “leer” en ellos la procedencia geográfica y los desplazamientos de un pez con un notable nivel de detalle espacial. La gran diversidad geológica de la cuenca se traduce en un marcado contraste en los valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre regiones, lo que cumple una condición fundamental para que un geomarcador sea útil: debe haber variación ambiental geográficamente estructurada. En efecto, en la Cuenca del Plata existen secciones bien diferenciadas (p. ej., Paraguay vs. Paraná vs. Uruguay vs. estuario) con firmas isotópicas únicas, lo que permitió asignar orígenes y rutas con resolución de cuenca o subcuenca. Esta situación contrasta con cuencas geológicamente más homogéneas, donde el $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ puede ser prácticamente uniforme y, por ende, poco informativo. En el caso del Plata, la herramienta isotópica logró, por primera vez, documentar con certeza fenómenos que antes solo se sospechaban: migraciones de cientos de kilómetros, intercambio de individuos entre cuencas adyacentes y uso de hábitats remotos como áreas de cría. Un aspecto particularmente ventajoso es que el método proporciona una integración temporal de la historia del pez – cada otolito contiene el registro continuo del ambiente desde el nacimiento hasta la captura. Esto es imposible de lograr con métodos tradicionales: por ejemplo, la telemetría revela movimientos en tiempo real, pero suele limitarse a meses o a pocos años de seguimiento y a un área acotada (además de requerir capturar y marcar previamente al animal). En cambio, la “lectura retrospectiva” de otolitos puede realizarse incluso en individuos

capturados en la pesca comercial, maximizando el aprovechamiento de las muestras. Los estudios de Avigliano *et al.* demostraron que, a partir de muestras puntuales de peces, es posible inferir patrones migratorios poblacionales a gran escala, una aproximación de enorme valor para especies cuya gestión concierne a varios países.

4.2. IMPLICACIONES PARA LA ECOLOGÍA Y MANEJO PESQUERO

La identificación de áreas de desove, cría y reclutamiento es un insumo esencial para el manejo y conservación de recursos pesqueros. El estudio del sistema Río del Valle-Bermejito, en el gradiente Yungas-Chaco, es un buen ejemplo (Avigliano *et al.* 2025): los perfiles de sábalo y dorado sugieren que numerosos adultos capturados en áreas protegidas de las cabeceras no habrían nacido allí, sino en sectores bajos o humedales de la llanura chaqueña, correspondientes a áreas productivas, y luego migraron aguas arriba hacia ríos de montaña protegidos. Por lo tanto, para garantizar la conservación del recurso se deben proteger todo el corredor migratorio, entre áreas protegidas de altura y las llanuras sin categorías de protección.

Otro aporte significativo de estos estudios es la demostración de la *plasticidad intraespecífica* de los patrones migratorios. No todos los individuos siguen la misma ruta ni utilizan los mismos hábitats en las mismas proporciones. Esto sugiere que las poblaciones poseen estrategias alternativas (por ejemplo, algunos individuos de dorado pueden residir varios años en un tributario, mientras otros migran anualmente entre el río principal y tributarios). Desde el punto de vista de la ecología de poblaciones, esta plasticidad puede conferir cierta resiliencia ante cambios ambientales locales – es decir, si un hábitat crucial se degrada, al menos parte de la población proviene de otros hábitats. Sin embargo, si las amenazas son generalizadas (por ejemplo, múltiples barreras en todos los tributarios, o contaminación difusa), entonces esa plasticidad no bastará para evitar las mermas poblacionales. En el caso del sábalo, su amplia distribución y múltiples áreas de cría sugieren un alto potencial de compensación, pero a la vez cualquier impacto en la región de la cuenca alta (e.g., contaminación minera en Pilcomayo) podría trasladarse río abajo a la pesquería comercial, no solo vía agua sino vía reducción de reclutamiento. Así, los manejadores deben considerar medidas integrales de cuenca completa, incluyendo monitoreo de calidad del agua y de los sedimentos, protección de corredores fluviales y mantenimiento de caudales ecológicos para permitir las migraciones.

4.3. CONTRIBUCIÓN DE SR/CA Y TRAZADORES MÚLTIPLES

La inclusión de la relación Sr/Ca en los análisis (y, potencialmente, de otros elementos traza) constituye una importante mejora metodológica, evidenciada en 2021 por Avigliano *et al.* Como se discutió, la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ por sí sola puede ser insuficiente para distinguir entre dos ríos geológicamente similares. En la Cuenca del Plata esto ocurrió en sectores específicos, y la medición de Sr/Ca complementó el panorama al reflejar la *química* del agua además de su isotopía. Un ejemplo claro fue el noroeste (con ríos todos de aguas “duras” sobre basamento precámbrico), donde los isotopos eran uniformes, pero uno de los ríos presentaba Sr disuelto más abundante, lo cual quedó capturado en un Sr/Ca de otolito más alto. Esta integración permitió lograr clasificación perfecta de algunos ríos que antes se confundían. Por tanto, para futuros estudios en cuencas complejas, se recomienda adoptar un enfoque *multitrazador* siempre que sea posible: medir no solo $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, sino también Sr/Ca, Ba/Ca, u otros proxies (como isotopía de otros elementos si estuviera disponible, o relaciones de elementos raros). Cabe señalar que la Sr/Ca en otolitos también se ha usado ampliamente para distinguir movimientos entre agua dulce y salada, dado que aumenta marcadamente en ambientes estuarinos o marinos (debido a la mayor concentración de Sr respecto al Ca). En nuestro contexto, ninguno de los peces estudiados es anádromo, pero sí incursionan en el estuario donde el Sr/Ca elevado confirmó dichas incursiones. Igualmente, valores locales de Sr/Ca pueden ayudar a detectar ingresos a lagunas salobres, aguas subterráneas cargadas en minerales, etc., que isotópicamente quizás no difiera pero elementalmente sí.

El Ba/Ca, en cambio, mostró ser menos universal en su utilidad. Aunque en otros estudios se ha empleado Ba/Ca para inferir el uso de ambientes hipopelágicos o el pulso de inundación (pues el bario puede aumentar en aguas anóxicas de planicies inundables), en la Cuenca del Plata los resultados con sábalo no arrojaron correlaciones claras con el agua Avigliano *et al.* (2021). Posiblemente el Ba presenta dinámicas más locales y dependientes de condiciones químicas (pH, redox), difíciles de extrapolar a nivel de toda la cuenca, o bien la incorporación de Ba al otolito esté más regulada biológicamente. En cualquier caso, no parece aportar un gran poder discriminante adicional en este sistema.



4.4. LIMITACIONES Y DESAFÍOS DEL ENFOQUE ISOTÓPICO

Si bien los logros de estos estudios son notables, es importante reconocer las limitaciones inherentes y los desafíos pendientes al emplear $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para rastrear peces. En primer lugar, la resolución espacial del método depende críticamente de la calidad y la extensión de la línea base geoquímica. Las regiones de la cuenca con escasa caracterización (pocos datos de agua disponibles) quedan como “zonas grises” en las que interpretar un valor de otolito resulta ambiguo. Avigliano *et al.* enfatizaron en 2020, la necesidad de ampliar el conocimiento espaciotemporal de los marcadores geoquímicos en ciertas áreas de la Cuenca del Plata, notando que ello supone un reto económico y logístico importante. Por ejemplo, la confluencia de grandes ríos con regímenes hidrológicos distintos (diferente proporción estacional de aportes) puede generar variaciones temporales en la química que complican la interpretación de los otolitos. Si un pez transita por una zona de confluencia donde las aguas se mezclan, su otolito podría registrar un valor intermedio, difícil de asignar de manera unívoca a una u otra fuente. Asimismo, cambios estacionales en $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del agua podrían ocurrir en algunas locaciones (por ejemplo, el estudio con bivalvos detectó una ligera diferencia estacional en la desembocadura del Uruguay). En la mayoría de los sitios evaluados no se hallaron variaciones significativas entre estaciones en la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, lo que indica que este marcador tiende a ser bastante estable anualmente – una ventaja considerable. No obstante, para mejorar la precisión sería ideal contar con muestreos de agua en distintas épocas del año y en diversos caudales, especialmente en aquellos tributarios o tramos donde confluyen aguas de distinta procedencia (p.ej., en épocas de crecidas extraordinarias podría cambiar la proporción de contribuyentes).

Otra limitación surge cuando *diferentes ambientes comparten firmas isotópicas muy similares*. Esto ya se mencionó para grandes ríos geológicamente similares, pero también puede ocurrir a menor escala: p. ej., dos arroyos vecinos drenando suelos similares pueden ser indistinguibles isotópicamente. En estos casos, un pez que migra entre ellos no mostraría un cambio apreciable en la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en su otolito, lo que podría dar la falsa impresión de *residencia* continua en un solo lugar. Trabajos recientes han propuesto métodos para abordar esta incertidumbre, como el análisis de *umbrales* de variabilidad isotópica en otolitos para definir cuándo un pez debe considerarse migrador o residente. Por ejemplo, un metaanálisis de múltiples estudios sugirió que si la variabilidad isotópica dentro del otolito supera ~30% de la variabilidad ambiental disponible, es muy probable que el pez sea migrador, mientras que variaciones menores al ~8% indicarían

sedentarismo. Aunque estas cifras proporcionan un criterio cuantitativo general, la aplicación requiere haber caracterizado adecuadamente la variación ambiental máxima en la región de estudio, lo que vuelve al punto de la necesidad de líneas base robustas. Se podrían desarrollar modelos de aprendizaje para espinas que podrían integrar: microimagen de la sección, concentración elemental por LA-ICP-MS, razón Sr/Ca, tamaño corporal, edad estimada, hidrología local, isoscape regional y, cuando exista, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ medido en submuestras de validación. Ese modelo produciría una estimación probabilística de la razón isotópica esperada y también, una probabilidad de pertenencia a cada subcuenca.

Otra exploración interesante es el uso de organismos *bioindicadores* que registren la química del agua de forma continua. En Avigliano *et al.* (2024) investigaron si las conchas del mejillón dorado (*Limnoperna fortunei*), un bivalvo invasor ampliamente distribuido en la cuenca, podían servir como análogos de otolitos ambientales. Encontraron que las conchas de estos bivalvos efectivamente incorporan $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en equilibrio con el agua ($R^2 \sim 0.96$ entre concha y agua), y aunque para Sr/Ca hubo pequeñas diferencias de pendiente posiblemente por factores biológicos, no se detectaron variaciones estacionales marcadas en las conchas en la mayoría de las regiones. Esto sugiere que podrían instalarse redes de bivalvos o analizar conchas recolectadas a lo largo de la cuenca para monitorear en tiempo real la composición isotópica del agua y llenar vacíos en la isoscape, sin los costos elevados de muestreo y análisis del agua. Contar con un mapa isotópico dinámico y de alta resolución espacial ayudaría a resolver ambigüedades en la interpretación de otolitos e incluso a anticipar cambios en las rutas migratorias si, por ejemplo, una represa altera la mezcla de aguas y, por ende, la señal isotópica en el tramo aguas abajo.

4.5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Siguiendo las recomendaciones de los autores y las necesidades identificadas, se vislumbran varias direcciones para profundizar el uso de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en ecología de peces neotropicales:

(1) **Ampliación del muestreo geoquímico** a tributarios menores y a diferentes momentos hidrológicos, para mejorar la resolución del mapa de isótopos en la Cuenca del Plata – por ejemplo, caracterizar ríos de la margen boliviana (Pilcomayo, Bermejo) y su variación anual;

(2) **Integración de métodos** – combinar la microquímica de otolitos con técnicas complementarias como telemetría electrónica o genética de poblaciones, de modo de validar inferencias de conectividad y distinguir, por ejemplo, si diferentes rutas migratorias corresponden a contingentes genéticos distintos o a plasticidad dentro de la misma población;

(3) **Análisis de efectos de fragmentación** – aplicar este enfoque antes y después de la construcción de nuevas represas (o en tramos actualmente desconectados) para cuantificar la alteración en la migración: los otolitos de peces residentes aguas abajo de una represa podrían revelar la ausencia de señales provenientes de aguas arriba tras el cierre, confirmando la pérdida de conectividad. En ese sentido, estudios en otras cuencas han usado $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para revelar la reducción de movimientos de peces pequeños en presencia de represas, abriendo camino a evaluar la eficacia de medidas mitigatorias;

(4) **Aplicación a más especies** – hasta ahora se han estudiado principalmente las cuatro especies emblemáticas, pero la cuenca alberga otros migradores grandes (ej. *Zungaro jahu*, *Brycon orbignyanus*) y migradores de menor tamaño (muchas *Prochilodus* y otros Characiformes) que podrían investigarse con este método. De hecho, un estudio reciente sugiere que incluso peces de talla pequeña que migran entre arroyos pueden ser rastreados con $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Avigliano *et al.* 2020a), lo cual podría aplicarse a especies forrajeras o de interés para la conservación.

(5) **Monitoreo de cambios ambientales** – dado que los otolitos almacenan información histórica, se podrían analizar otolitos antiguos (por ejemplo, de colecciones de museo o restos arqueológicos) para comparar patrones migratorios actuales vs. históricos. Avigliano *et al.* 2020 b reportaron una primera descripción de la complejidad actual; un siguiente paso podría ser evaluar si esa complejidad disminuyó respecto a, digamos, 50 años atrás antes de grandes represas, lo que daría evidencia directa del impacto antropogénico en las migraciones. Asimismo, vincular la información isotópica con datos de contaminantes en los peces (metales pesados, etc.) puede esclarecer relaciones entre el uso del hábitat y la exposición a la polución.

En definitiva, la aplicación de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en peces de la Cuenca del Plata ha abierto una nueva ventana para comprender su dinámica migratoria con un nivel de detalle sin precedentes. Si bien existen desafíos en completar la imagen geoquímica y en sortear limitaciones analíticas, los beneficios en conocimiento ecológico y las posibilidades de manejo adaptativo, informadas por ciencia sólida, son inmensos. Continuar estas investigaciones y expandirlas a nuevos contextos contribuirá a una gestión más efectiva de los recursos pesqueros y a la conservación de la biodiversidad acuática en una de las cuencas fluviales más importantes de Sudamérica.

5 CONCLUSIONES

El uso de la relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en otolitos se ha consolidado como una herramienta poderosa para reconstruir la historia de desplazamiento de peces migratorios en la Cuenca del Plata. Los estudios recientes de Avigliano *et al.* realizados entre 2019 y 2023, demuestran que, aprovechando la heterogeneidad geoquímica de la cuenca, es posible identificar la procedencia natal de especies clave (sábalo, dorado, patí, surubí) y trazar sus rutas migratorias con alta resolución espacial. Las firmas isotópicas del agua quedan fielmente registradas en los otolitos, lo que permite detectar desplazamientos de largo alcance (> 1000 km) que conectan distintas subcuencas e incluso diferentes países. Se evidenció que estas especies utilizan múltiples entornos durante su ciclo de vida –desde ríos andinos y embalses hasta deltas y estuarios– y que mantienen cierta conectividad aun en presencia de barreras parciales como represas de vertedero. La incorporación de marcadores complementarios como Sr/Ca potenció la capacidad de discriminar hábitats y evidenció matices adicionales en los patrones migratorios.

Estos hallazgos proporcionan información científica sólida para guiar la gestión pesquera regional. En particular, subrayan la necesidad de enfoques de manejo integrados a escala de cuenca y cooperativos entre naciones, dado que las poblaciones de peces trascienden los límites jurisdiccionales. La identificación de áreas de desove y crianza críticas (algunas previamente no reconocidas) ofrece focos concretos de conservación, donde habría que enfocar esfuerzos de protección de hábitat. Asimismo, los resultados destacan la importancia de mantener la conectividad fluvial: asegurar caudales ecológicos, implementar pasos de peces en represas y conservar corredores libres resulta fundamental para la sobrevivencia de estas especies migratorias.



Los resultados destacan la importancia de mantener la conectividad fluvial, asegurar caudales ecológicos, implementar pasos de peces en represas y conservar corredores libres resulta fundamental para la sobrevivencia de estas especies migratorias.”



Si bien el enfoque isotópico con $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ conlleva retos (necesidad de una amplia caracterización geoquímica, equipamiento especializado, interpretación cuidadosa en zonas con señales similares), sus beneficios superan ampliamente las limitaciones. Representa una forma de “seguir al pez” a lo largo de toda su vida, algo inalcanzable por otros medios. Hacia futuro, la expansión de este tipo de estudios –incorporando más sitios, más especies y combinando con otras técnicas– permitirá afinar aún más nuestro entendimiento. Por ejemplo, aplicar esta metodología a cuencas fragmentadas por grandes represas podría cuantificar pérdidas de conectividad y guiar acciones mitigadoras; del mismo modo, explorar archivos alternativos (espinas, conchas) y desarrollar mapas isotópicos predictivos robustos mejorará la precisión en la asignación de orígenes, incluso en tributarios poco muestreados.

En conclusión, la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se erige como un marcador natural sumamente valioso en la ecología pesquera fluvial. En la Cuenca del Plata, su aplicación ha revelado una dinámica migratoria más compleja de lo imaginado, aportando conocimiento clave para manejar de forma sostenible las pesquerías y conservar el patrimonio íctico. Las migraciones de peces neotropicales, antes crípticas, están comenzando a “escribirse” en el lenguaje de los isótopos de estroncio, y la traducción de ese lenguaje nos capacita para tomar decisiones de manejo mejor informadas en uno de los ecosistemas fluviales más importantes de Sudamérica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avigliano E *et al.* (2020a). Strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) reveal the life history of freshwater migratory fishes in the La Plata Basin. *River Research and Applications*, 36(9), 1704–1719.
- Avigliano E *et al.* (2020b). Fin spine metals by LA-ICP-MS as a method for fish stock discrimination of *Genidens barbus* in anthropized estuaries. *Fisheries Research*, 230, 105625.
- Avigliano E *et al.* (2021). Otolith Sr/Ca ratio complements Sr isotopes to reveal fish migration in large basins with heterogeneous geochemical landscapes. *Environmental Biology of Fishes*, 104(3), 277–292.
- Avigliano E *et al.* (2023). Strontium isotope mapping and its application to study the fish life history (*Salminus brasiliensis*) in semi-fragmented rivers (La Plata Basin). *Fisheries Research*, 265, 106741.
- Avigliano E *et al.* (2023). Siberian and Russian sturgeon natal origin in South America: Fish farm or established population? *Austral Ecology*, 48, 1–11.
- Avigliano E *et al.* (2023). Environmental history of one of the largest freshwater neotropical fish (*Zungaro jahu*) from otolith isotopic analysis. *River Research and Applications*, 39, 887–896.
- Avigliano E *et al.* (2024). An invasive bivalve with the potential to reconstruct chronologies of geo-markers in a large South American basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 32060–32071.
- Avigliano E *et al.* (2025). Fish migration patterns in semi-isolated and seasonally variable freshwater systems from the Yungas Forest to the Chaco Plain (South America). *River Research and Applications*, 42, 311–324.