



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL E
RECURSOS PESQUEIROS – PPGCARP

Mapeamento de isótopos de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) e sua aplicação no estudo da história de vida de peixes (*Cichla temensis*) em rios da Bacia Amazônica

MARCOS DE ALMEIDA MERELES

MANAUS - AM
2025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL E
RECURSOS PESQUEIROS – PPGCARP**

Tese

Mapeamento de isótopos de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) e sua aplicação no estudo da história de vida de peixes (*Cichla temensis*) em rios da Bacia Amazônica

MARCOS DE ALMEIDA MERELES

Orientador: Carlos Edwar de Carvalho Freitas - UFAM

Coorientadores: Marc Pouilly - IRD

Raniere Garcez Costa Sousa - UNIR

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros, área de concentração em Uso Sustentável de Recursos Pesqueiros.

Manaus - AM
2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M559m Mereles, Marcos de Almeida
Mapeamento de isótopos de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) e sua aplicação no estudo da história de vida de peixes (*Cichla temensis*) em rios da Bacia Amazônica / Marcos de Almeida Mereles. - 2025.
58 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Carlos Edwar de Carvalho Freitas.
Coorientador(a): Marc Pouilly.
Coorientador(a): Raniere Garcez Costa Sousa.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros, Manaus, 2025.

1. Isótopos de Sr. 2. Geoestatística. 3. Otólitos. 4. Tucunaré-acú. 5. Padrão de movimentação. I. Freitas, Carlos Edwar de Carvalho. II. Pouilly, Marc. III. Raniere Garcez Costa Sousa. IV. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros. V. Título



Poder Executivo
Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



CARLOS EDUAR DE CARVALHO FREITAS
Data: 15/04/2025 13:12:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

.....
Doutor Carlos Edwar de Carvalho Freitas
(Presidente)

.....
Luciana Alves Pereira

Doutora Luciana Alves Pereira
(Membro Titular)

Documento assinado digitalmente



CAROLINA RODRIGUES DA COSTA DORIA
Data: 15/04/2025 14:20:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

.....
Doutora Carolina Rodrigues da Costa
Doria
(Membro Titular)

Documento assinado digitalmente



SIDINEIA APARECIDA AMADIO
Data: 15/04/2025 15:09:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

.....
Doutora Sidineia Aparecido Amadio
(Membro Titular)

.....
Fabrice Duponchelle

Doutor Fabrice Duponchelle
(Membro Titular)

Ciência do Discente: *Marcos de Almeida Moraes*

Manaus (AM), 15 de abril de 2025

Dedicatória
À minha família, em especial meus pais
Oliveira Mereles e Benedita Aparecida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, sabedoria e por nunca ter me desamparado nos momentos de dificuldades e incertezas ao longo dessa caminhada.

À minha família, em especial a meus pais Oliveira Mereles e Benedita Aparecida, e irmã Divana Mereles, pela educação e apoio incondicional.

Ao meu orientador Carlos Freitas, pelos ensinamentos e profissionalismo, que irei levar para a vida toda. E por ter me concedido a oportunidade de fazer parte do seu grupo de pesquisa.

Ao meu coorientador Raniere Garcez, por ter me acompanhado desde a graduação ao doutorado, me incentivando e me mostrando “os caminhos das pedras”.

Ao Marc Pouilly pelos ensinamentos e auxílio nas análises laboratoriais no período de mobilidade acadêmica na França.

Aos meus amigos Raony Belém, Diego Valente, Marcos Repolho e Gisele Santos pelo auxílio na coleta em campo, sem vocês seria muito mais difícil. Muito obrigado!

Ao Sr. Gono e Família por todo apoio na coleta de campo.

À Chiara Lubich pelo auxílio no tratamento das imagens.

Aos membros do Instituto Piatam, pelos momentos de descontrações, convívio e troca de conhecimento durante essa caminhada.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM, pela concessão de bolsa de estudo durante o doutorado e apoio financeiro para análises.

Ao Institut de Recherche pour le Développement – IRD pela mobilidade acadêmica na França através do programa e apoio nas análises microquímicas.

À Universidade Federal do Amazonas, pela oportunidade de estudo e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros - PPGCARP, pela capacitação profissional.

A todos que contribuíram diretamente e indiretamente para construção do trabalho, meu muito obrigado!

RESUMO

A razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ tem sido empregada como uma ferramenta valiosa para identificar a origem e os padrões de migração de organismos aquáticos, além de subsidiar pesquisas ambientais e forenses. Na bacia amazônica, no entanto, a modelagem espacial dessa razão ainda é incipiente, limitando aplicações em larga escala. Para preencher essa lacuna, este estudo estabeleceu uma linha de base da assinatura isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em águas superficiais da região, combinando dados de publicações científicas e amostras coletadas em campo. Utilizando um modelo geoestatístico baseado em interpolação espacial (IDW), foi possível mapear a distribuição isotópica em locais não amostrados. Os resultados revelaram alta heterogeneidade nas águas da Amazônia, com valores mais baixos associados a bacias andinas com formações mais recentes e valores mais elevados em áreas de escudos cristalinos antigos, como os Escudos da Guiana e do Brasil. A precisão do modelo foi confirmada pela forte correlação entre valores previstos e observados em otólitos de peixes ($R^2 = 0,81$), destacando seu potencial para estudos em diversas escalas. Aplicando essa metodologia, investigou-se o movimento do tucunaré-açú (*Cichla temensis*), espécie-chave para a economia e ecologia local, em afluentes do médio Rio Negro. Foram analisadas amostras de água e otólitos de 79 indivíduos em seis sub-bacias, durante o período de águas baixas. As análises detectaram variações significativas nas assinaturas isotópicas entre os afluentes: rios da margem direita (Cuiuni e Caurés) apresentaram razões mais baixas, enquanto o rio Aracá (margem esquerda) exibiu valores elevados, refletindo diferenças geológicas regionais. A correlação linear entre as razões isotópicas da água e dos otólitos ($R^2 = 0,95$) validou o método para rastrear deslocamentos. A maioria dos peixes (64 indivíduos) permaneceu em suas sub-bacias de origem, indicando comportamento residente. Contudo, transectos nos otólitos revelaram movimentos entre sub-bacias, como entre Aracá e Demeni, sugerindo a existência de corredores ecológicos que conectam habitats distintos. Os resultados reforçam a importância da conectividade hidrológica para a manutenção da diversidade genética e da resiliência populacional, especialmente em um cenário de crescentes pressões antrópicas. O estudo também aponta a necessidade de ampliar a coleta de dados isotópicos e integrar novas tecnologias geoespaciais para aprimorar a precisão das modelagens. Além disso, destaca-se a relevância de monitorar habitats críticos e estender pesquisas a escalas temporais mais amplas, garantindo a eficácia de planos de manejo. Ao unir modelagem ambiental e análises isotópicas, esta pesquisa não apenas avança o entendimento sobre a ecologia de espécies icônicas como o tucunaré-açú, mas também oferece um marco metodológico para conservação e gestão sustentável de ecossistemas complexos, como os da Bacia Amazônica.

Palavras-chave: Isótopos de Sr; Geoestatística; Otólitos, Tucunaré-açú; Padrão de movimentação.

ABSTRACT

The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio has been used as a valuable tool to identify the origin and migration patterns of aquatic organisms, as well as supporting environmental and forensic research. In the Amazon basin, however, spatial modeling of this ratio is still incipient, limiting large-scale applications. To fill this gap, this study established a baseline of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic signature in surface waters in the region, combining data from scientific publications and samples collected in the field. Using a geostatistical model based on spatial interpolation (IDW), it was possible to map the isotopic distribution in unsampled locations. The results revealed high heterogeneity in Amazonian waters, with lower values associated with Andean basins with more recent formations and higher values in areas of ancient crystalline shields, such as the Guiana and Brazilian Shields. The model's accuracy was confirmed by the strong correlation between predicted and observed values in fish otoliths ($R^2 = 0.81$), highlighting its potential for studies at various scales. Using this methodology, we investigated the movement of the tucunaré-açu (*Cichla temensis*), a key species for the local economy and ecology, in tributaries of the middle Rio Negro. Water samples and otoliths from 79 individuals in six sub-basins were analyzed during the low-water period. The analyses detected significant variations in the isotopic signatures between the tributaries: rivers on the right bank (Cuiuni and Caurés) showed lower ratios, while the Aracá River (left bank) showed high values, reflecting regional geological differences. The linear correlation between the isotopic ratios of water and otoliths ($R^2 = 0.95$) validated the method for tracking displacements. Most of the fish (64 individuals) remained in their sub-basins of origin, indicating resident behavior. However, transects in the otoliths revealed movements between sub-basins, such as between Aracá and Demeni, suggesting the existence of ecological corridors connecting distinct habitats. The results reinforce the importance of hydrological connectivity for maintaining genetic diversity and population resilience, especially in a scenario of increasing anthropogenic pressures. The study also points to the need to expand the collection of isotopic data and integrate new geospatial technologies to improve the accuracy of modeling. In addition, it highlights the importance of monitoring critical habitats and extending research to broader time scales, ensuring the effectiveness of management plans. By combining environmental modeling and isotopic analysis, this research not only advances understanding of the ecology of iconic species such as the tucunaré-açu, but also offers a methodological framework for the conservation and sustainable management of complex ecosystems such as those in the Amazon Basin.

Keywords: Sr isotopes; Geostatistics; Otoliths, Tucunaré-açu; Movement pattern.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	7
HIPÓTESE	15
OBJETIVOS	15
ORGANIZAÇÃO DA TESE	16
CAPÍTULO 1 - Distribution of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in surface waters of the Amazon basin: A basis for studies on provenance.....	17
CAPÍTULO 2 - Assinaturas isotópicas de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) revelam padrão de residência e dispersões ocasionais para o tucunaré-açu (<i>Cichla temensis</i>) em afluentes do Médio Rio Negro.....	28
SÍNTESE.....	57

APRESENTAÇÃO

A bacia Amazônica, maior sistema fluvial do mundo, abriga uma biodiversidade única e desempenha um papel crucial nos ciclos biogeoquímicos do planeta (FILIZOLA; GUYOT, 2011; TISSEUIL et al., 2013). Sua extensão abrange aproximadamente 7 milhões de km², incluindo áreas de nove países, com rios que transportam cerca de 20% da água doce para os oceanos (LUNDBERG et al., 1998). A geologia da Amazônia é marcada por uma complexa diversidade litológica, incluindo crátons antigos (como o Escudo das Guianas), bacias sedimentares e rochas vulcânicas (FILIZOLA et al., 2025). Essa heterogeneidade geológica cria "assinaturas" isotópicas distintas em diferentes sub-bacias, que podem ser usadas para rastrear a proveniência de sedimentos e organismos aquáticos (JEONG et al., 2024).

O monitoramento dos processos de migração e dispersão de peixes entre diversos habitats da bacia Amazônica representa um desafio significativo, especialmente devido à vasta extensão dos rios e à dificuldade em capturar espécimes individuais (HERMANN et al., 2021). Essa limitação tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas inovadoras que possam fornecer registros precisos dos trajetos percorridos pelos peixes. Dentre as alternativas disponíveis, a microquímica de otólitos tem se destacado como uma abordagem eficiente, superando métodos tradicionais como marcação/recaptura e telemetria (AVIGLIANO, 2022). A eficiência dessa abordagem decorre da relação consistente entre a composição química dos otólitos e a química da água em que os peixes habitaram em algum momento do ciclo de vida, permitindo a reconstrução de suas rotas migratórias (CAMPANA, 1999; CAMPANA; THORROLD, 2001).

Um dos elementos centrais dessa abordagem, utilizado como proxy para compreender as variações geográficas, é a razão isotópica estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) (KENNEDY et al., 2000). Tais variações são decorrentes do decaimento β do ^{87}Rb , além das diferenças na quantidade inicial de ^{87}Rb presente nas rochas e na idade dos diferentes tipos de litologia (NIGRO; SAPPÀ; BARBIERI, 2017). O estrôncio é liberado ao ambiente devido ao intemperismo das rochas, sendo posteriormente incorporado nos tecidos ósseos dos animais por meio da dieta (STEWART; CAPO; CHADWICK, 1998). Essa incorporação acontece quando o estrôncio substitui o cálcio na estrutura da hidroxiapatita, presente em ossos e em outras estruturas calcificadas (HOPPE; KOCH; FURUTANI, 2003).

O mapeamento detalhado das variações isotópicas na região de estudo é um pré-requisito para a interpretação das assinaturas presentes nos materiais orgânicos (BATAILLE; BOWEN, 2012). Recentes esforços têm agregado dados geológicos publicados para criar linhas de base em rios da bacia Amazônica, permitindo estudar processos como a taxa de erosão, o transporte sedimentar e a interação entre a água e os sedimentos (BOUCHEZ et al., 2010; DOUGLAS et al., 1995; GAILLARDET et al., 1997; GOLDSTEIN; JACOBSEN, 1988; GOLDSTEIN; O'NIONS; HAMILTON, 1984; PALMER; EDMOND, 1992; WANG et al., 2001; WANG; ZHANG; LIU, 2007). Estudos na região, demonstraram que as variações na razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ estão fortemente correlacionadas com a geologia das áreas de origem dos sedimentos (SANTOS et al., 2015).

As variações na razão isotópica de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) na bacia Amazônica refletem a diversidade geológica de suas sub-regiões. Valores mais elevados são observados nos rios que drenam os escudos Brasileiro e Guianense, que são compostos por rochas cristalinas pré-cambrianas, como granitos e gnaisses, ricas em minerais radiogênicos (por exemplo, rubídio), cujo decaimento ao longo de bilhões de anos enriquece o ^{87}Sr . Em contraste, as planícies aluviais da Amazônia central apresentam razões isotópicas mais baixas, associadas a sedimentos jovens derivados dos Andes e de bacias sedimentares cenozoicas, onde rochas vulcânicas e carbonáticas, pobres em rubídio e com menor tempo de evolução isotópica, predominam. Essa dicotomia é resultado da história geológica da bacia: enquanto os escudos preservam materiais antigos e intemperizados lentamente, as planícies acumulam sedimentos recentes, transportados por sistemas fluviais dinâmicos que retrabalham materiais menos radiogênicos, como os provenientes da erosão andina. Assim, a assinatura isotópica espelha processos de formação, erosão e transporte sedimentar atuantes em escalas temporais distintas (SANTOS et al., 2015; GAILLARDET et al., 1997).

Apesar do imenso potencial da análise isotópica de estrôncio para elucidar aspectos dos sistemas ecológicos, seu uso tem sido limitado principalmente pelo custo elevado das análises em larga escala e pela escassez de dados de linha de base biodisponível. Para contornar essas limitações, as isoscapes surgiram como uma ferramenta de visualização inovadora e de baixo custo, integrando diversas fontes que contribuem para o “pool” isotópico disponível (BOWEN et al., 2014; SILVA et al., 2023). A aplicação dessas técnicas permite não apenas delinear rotas de migração, mas também identificar habitats críticos para atividades essenciais dos peixes, como a desova, o forrageamento e o refúgio (AVIGLIANO;

VOLPEDO, 2016). Compreender os movimentos e a distribuição das espécies é fundamental para estabelecer estratégias de manejo e conservação, principalmente em cenários onde a exploração intensiva ou a degradação do habitat podem afetar populações locais (SHAKLEE; BENTZEN, 1998; SMITH; WHITLEDGE, 2010).

O gênero *Cichla*, composto por 17 espécies, ocorre naturalmente em diversos ambientes aquáticos da América do Sul (KULLANDER; FERREIRA, 2006; SABAJ *et al.*, 2020). Dentre elas, *Cichla temensis* destaca-se por ser a maior do grupo, podendo alcançar cerca de 1 metro de comprimento e mais de 13 kg (JEPSEN; WINEMILLER; TAPHORN, 1997). Conhecido popularmente como tucunaré-paca ou acú, devido ao seu padrão de coloração, que está associado aos estágios reprodutivos (REISS *et al.*, 2012). A espécie apresenta desova parcelada ao longo do ano, intensificada durante o período de águas baixas, além de hábitos diurnos e territorialistas, sendo considerada sedentária (GRANADO - LORENCIO; LIMA; LOBÓN - CERVIÁ, 2005). Contudo, estudos indicam dispersões de até 40 km em tributários, sugerindo mobilidade significativa (HOEINGHAUS *et al.*, 2003; HOLLEY *et al.*, 2008).

A distribuição de *C. temensis* abrange principalmente as bacias do rio Amazonas e do Orinoco (Venezuela e Colômbia), restrita a rios de água preta e seus afluentes (KULLANDER; FERREIRA, 2006; WINEMILLER *et al.*, 2008). Há registros adicionais na drenagem do rio Branco na Guiana (LOWE-MCCONNELL, 1969). Como predador de topo de cadeia, a espécie regula a estrutura trófica de ecossistemas aquáticos, influenciando diretamente a dinâmica das comunidades (JEPSEN *et al.*, 1999; JEPSEN; WINEMILLER; TAPHORN, 1997). Além do papel ecológico, é fundamental para a subsistência de comunidades ribeirinhas, sendo valorizada na alimentação, no comércio ornamental e na pesca esportiva (FREITAS; RIVAS, 2006).

No médio rio Negro, o *C. temensis* tem grande relevância econômica como principal alvo de pescarias (FREITAS; RIVAS, 2006; WILLIS *et al.*, 2015). No entanto, a exploração excessiva da espécie (LUBICH *et al.*, 2021; VIEIRA *et al.*, 2024), evidencia a necessidade de estratégias de manejo baseadas em evidência científicas, especialmente por sua vulnerabilidade à degradação de habitats e à pesca intensiva (HEATH *et al.*, 2008). Apesar de estudos apontarem fidelidade a ambientes específicos, padrões de movimento ainda são controversos, com registros de dispersões significativas entre habitats (SOUSA; HUMSTON; FREITAS, 2016; HOEINGHAUS *et al.*, 2003). Essas controversas sobre a movimentação da

espécie, reforça a importância de pesquisas contínuas para orientar medidas de manejo que garantam a conservação da espécie e dos ecossistemas que habitam.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe: 1) mapear a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da água nos principais rios da Bacia Amazônica, e 2) investigar os processos de movimentação de *C. temensis* nos tributários do médio rio Negro utilizando razão isotópica de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para uma definição mais precisa das rotas de dispersão e dos habitats críticos, fornecendo subsídios relevantes para a implementação de estratégias de manejo e conservação das populações pesqueiras na região Amazônica.

REFERÊNCIAS

- AVIGLIANO, E. Optimizing the Methodological Design in Fish Stock Delineation from Otolith Chemistry: Review of Spatio-Temporal Analysis Scales. **Reviews in Fisheries Science & Aquaculture**, v. 30, n. 3, p. 330–345, 3 jul. 2022.
- BATAILLE, C. P.; BOWEN, G. J. Mapping $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in bedrock and water for large scale provenance studies. **Chemical Geology**, v. 304–305, p. 39–52, abr. 2012.
- BOUCHEZ, J. et al. Turbulent mixing in the Amazon River: The isotopic memory of confluences. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 290, n. 1–2, p. 37–43, fev. 2010.
- BOWEN, G. J. et al. Geographic assignment with stable isotopes in IsoMAP. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 5, n. 3, p. 201–206, 20 mar. 2014.
- CAMPANA, S. E. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. **Marine Ecology Progress Series**, v. 188, p. 263–297, 1999.
- CAMPANA, S. E.; THORROLD, S. R. Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 58, n. 1, p. 30–38, 1 jan. 2001.
- DOUGLAS, G. B. et al. A strontium isotopic investigation of the origin of suspended particulate matter (SPM) in the Murray-Darling River system, Australia. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 59, n. 18, p. 3799–3815, set. 1995.
- FILIZOLA, N. et al. Amazonas. Em: **Rivers of South America**. [s.l.] Elsevier, 2025. p. 213–237.
- FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 566–576, 1 dez. 2011.
- FREITAS, C. E. DE C.; RIVAS, A. A. F. A pesca e os recursos pesqueiros na Amazônia Ocidental. **Ciência e cultura**, v. 58, n. 3, p. 30–32, 2006.
- GAILLARDET, J. et al. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. **Chemical Geology**, v. 142, n. 3–4, p. 141–173, out. 1997.
- GOLDSTEIN, S. J.; JACOBSEN, S. B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 87, n. 3, p. 249–265, fev. 1988.
- GOLDSTEIN, S. L.; O'NIONS, R. K.; HAMILTON, P. J. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 70, n. 2, p. 221–236, out. 1984.

- GRANADO-LORENCIO, C.; LIMA, C. R. M. A.; LOBÓN-CERVIÁ, J. Abundance–distribution relationships in fish assembly of the Amazonas floodplain lakes. **Ecography**, v. 28, n. 4, p. 515–520, 2005.
- HEATH, M. R. et al. A model of meta-population dynamics for North Sea and West of Scotland cod—the dynamic consequences of natal fidelity. **Fisheries Research**, v. 93, n. 1–2, p. 92–116, 2008.
- HERMANN, T. W. et al. Harnessing the potential for otolith microchemistry to foster the conservation of Amazonian fishes. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 31, n. 5, p. 1206–1220, 25 maio 2021.
- HOEINGHAUS, D. J. et al. Movement of *Cichla* species (Cichlidae) in a Venezuelan floodplain river. **Neotropical Ichthyology**, v. 1, n. 2, p. 121–126, 2003.
- HOLLEY, M. H. et al. Analysis of the trophy sport fishery for the speckled peacock bass in the Negro River, Brazil. **Fisheries Management and Ecology**, v. 15, n. 2, p. 93–98, 2008.
- HOPPE, K. A.; KOCH, P. L.; FURUTANI, T. T. Assessing the preservation of biogenic strontium in fossil bones and tooth enamel. **International Journal of Osteoarchaeology**, v. 13, n. 1–2, p. 20–28, 30 jan. 2003.
- JEPSEN, D. B. et al. Age structure and growth of peacock cichlids from rivers and reservoirs of Venezuela. **Journal of fish Biology**, v. 55, n. 2, p. 433–450, 1999.
- JEPSEN, D. B.; WINEMILLER, K. O.; TAPHORN, D. C. Temporal patterns of resource partitioning among *Cichla* species in a Venezuelan blackwater river. **J Fish Biology**, v. 51, n. 6, p. 1085–1108, 1997.
- KENNEDY, B. P. et al. Using natural strontium isotopic signatures as fish markers: methodology and application. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 57, n. 11, p. 2280–2292, 1 nov. 2000.
- KULLANDER, S. O.; FERREIRA, E. J. G. A review of the South American cichlid genus *Cichla*, with descriptions of nine new species (Teleostei: Cichlidae). **Ichthyological Exploration of Freshwaters**, v. 17, n. 4, p. 289–398, 2006.
- LOWE-MCCONNELL, R. H. The cichlid fishes of Guyana, South America, with notes on their ecology and breeding behaviour. **Zoological Journal of the Linnean Society**, v. 48, n. 2, p. 255–302, maio 1969.
- LUBICH, C. et al. Effects of Fishing on the Population of Speckled Pavon *Cichla temensis* in the Middle Negro River (Amazonas State, Brazil): A Decrease in the Size of the Trophy

Fish? **Transactions of the American Fisheries Society**, v. 150, n. 6, p. 667–678, 23 nov. 2021.

LUNDBERG, J. G. et al. The stage for Neotropical fish diversification: a history of tropical South American rivers. **Phylogeny and Classification of Neotropical Fishes**, v. 27, p. 13–48, 1998.

NIGRO, A.; SAPPA, G.; BARBIERI, M. Strontium Isotope as Tracers of Groundwater Contamination. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 17, p. 352–355, 2017.

PALMER, M. R.; EDMOND, J. M. Controls over the strontium isotope composition of river water. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 56, n. 5, p. 2099–2111, maio 1992.

REISS, P. et al. Color pattern variation in *Cichla temensis* (Perciformes: Cichlidae): Resolution based on morphological, molecular, and reproductive data. **Neotropical Ichthyology**, v. 10, n. 1, p. 59–70, 2012.

SABAJ, M. H. et al. *Cichla cataraetae* (Cichliformes: Cichlidae), new species of peacock bass from the Essequibo Basin, Guyana and Venezuela. **Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia**, v. 167, n. 1, p. 69–86, 2020.

SANTOS, R. V. et al. Source area and seasonal $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in rivers of the Amazon basin. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 2, p. 187–197, 15 jan. 2015.

SHAKLEE, J. B.; BENTZEN, P. Genetic identification of stocks of marine fish and shellfish. **Bulletin of Marine Science**, v. 62, n. 2, p. 589–621, 1998.

SILVA, C. et al. Spatial distribution of strontium and neodymium isotopes in South America: a summary for provenance research. **Environmental Earth Sciences**, v. 82, n. 14, p. 348, 3 jul. 2023.

SMITH, K. T.; WHITLEDGE, G. W. Fin ray chemistry as a potential natural tag for smallmouth bass in northern Illinois rivers. **Journal of Freshwater Ecology**, v. 25, n. 4, p. 627–635, 2010.

STEWART, B. W.; CAPO, R. C.; CHADWICK, O. A. Quantitative strontium isotope models for weathering, pedogenesis and biogeochemical cycling. **Geoderma**, v. 82, n. 1–3, p. 173–195, 1998.

TISSEUIL, C. et al. Global diversity patterns and cross-taxa convergence in freshwater systems. **Journal of Animal Ecology**, v. 82, n. 2, p. 365–376, 22 mar. 2013.

VIEIRA, T. S. G. et al. Uma análise socioeconômica das pescarias comerciais do médio Rio Negro, Amazonas. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 22, n. 3, p. e3918, 27 mar. 2024.

WANG, Z. et al. Strontium isotopic geochemistry of the Changjiang estuarine waters: Implications for water-sediment interaction. **Science in China Series E: Technological Sciences**, v. 44, n. S1, p. 129–133, fev. 2001.

WANG, Z.-L.; ZHANG, J.; LIU, C.-Q. Strontium isotopic compositions of dissolved and suspended loads from the main channel of the Yangtze River. **Chemosphere**, v. 69, n. 7, p. 1081–1088, out. 2007.

WILLIS, S. C. et al. Population genetics of the speckled peacock bass (*Cichla temensis*), South America's most important inland sport fishery. **Conservation genetics**, v. 16, n. 6, p. 1345–1357, 2015.

HIPOTESE

H₁: A variação espacial do $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na água, decorrente da heterogeneidade geológica da Bacia Amazônica, é refletida nos otólitos de *Cichla temensis*, permitindo identificar padrões de residência e dispersões entre sub-bacias.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Investigar a distribuição espacial de isótopos de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) em águas superficiais da Bacia Amazônica e avaliar de que forma essas variações podem subsidiar a compreensão dos padrões de movimentação e residência de *Cichla temensis*.

Objetivos Específicos

1. Investigar como a geologia regional determina a heterogeneidade do $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na Bacia Amazônica, a partir de dados de campo e modelagem geoestatística.
2. Validar a relação entre a assinatura isotópica da água e a registrada em otólitos de peixes, testando a acurácia do modelo desenvolvido.
3. Aplicar o modelo de distribuição isotópica para caracterizar padrões de residência e possíveis rotas de dispersão de *Cichla temensis*, enfatizando implicações para manejo e conservação.

ORGANIZAÇÃO DA TESE

A tese está estruturada em dois capítulos apresentados no formato de artigos científicos. O primeiro capítulo, foi publicado na revista *Science of The Total Environment* (<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178630>), estabelece uma linha de base para a razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em águas superficiais da Bacia Amazônica, permitindo inferir os padrões de procedência e migração dos peixes. O segundo capítulo, atualmente em processo de preparação para publicação, investiga os padrões de movimento do tucunaré-açú (*Cichla temensis*) em afluentes do médio Rio Negro (Amazônia, Brasil). São utilizadas assinaturas isotópicas de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) presentes em otólitos e na água, proporcionando uma análise detalhada de potenciais rotas de dispersão e de comportamentos de residência dos indivíduos em seus habitats de origem.

Mereles MA, Sousa RGC, Pouilly M, Pereira DV, Mc Comb GL, Filizola N, et al. Distribution of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in surface waters of the Amazon basin: A basis for studies on provenance. *Science of The Total Environment*. 2025; 965:178630. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178630>.



Distribution of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in surface waters of the Amazon basin: A basis for studies on provenance

Marcos de Almeida Mereles^{a,*}, Raniere Garcez Costa Sousa^b, Marc Pouilly^c,
Diego Valente Pereira^d, Gisellen Lima Mc Comb^a, Naziano Filizola^e, Roberto Ventura Santos^f,
Carlos Edwar de Carvalho Freitas^e

^a Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros, Av. General Rodrigo Octávio, 6200, Coroado II, 69077-000 Manaus, AM, Brazil

^b Departamento de Geografia, Universidade Federal de Rondônia, Rod. BR 364, Km 9,5, Porto Velho, RO CEP: 76801-059, Brazil

^c Institut de Recherche Pour le Développement, Laboratoire BOREA, Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, 61, Rue Buffon, 75005 Paris, France

^d Programa de Pós-graduação em Biologia de Água Doce e Pesca Interior, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Av. André Araújo, 2936, Petrópolis, 69067-375 Manaus, AM, Brazil

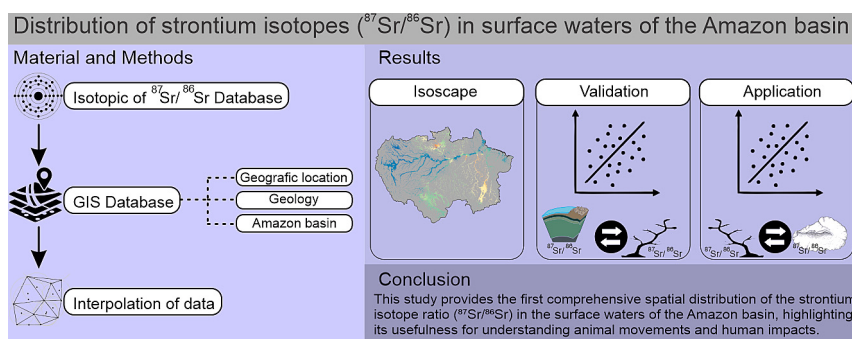
^e Universidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Otávio, 3000, Coroado II, 69077-000 Manaus, AM, Brazil

^f Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, Brasília, DF 70910-000, Brazil

HIGHLIGHTS

- An $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isoscape was developed for the Amazon basin.
- The Amazon basin exhibits high isotopic heterogeneity, reflecting the underlying geology.
- Lower proportions of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ are associated with recent geological formations and high proportions with ancient formations.
- The isoscape model accurately predicts the isotopic signature of fish otoliths.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Editor: Dingyong Wang

Dataset link: [Strontium Isoscape \(\$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}\$ \) in Surface Water from the Amazon Basin \(Original data\)](#)

Keywords:

Amazon Geology, Database, Fish, Isoscape

ABSTRACT

The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio has been widely used as an indicator of provenance and migration of aquatic animals, and has applications in other areas such as in environmental and forensic studies. However, the modeling of the spatial distribution in the Amazon basin is still incipient, preventing large-scale applications. In this study, we present a baseline of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio in surface waters of the Amazon basin to infer the provenance and migration patterns of fish. We have compiled an extensive $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ database of water samples from the Amazon basin, with data obtained from scientific publications and from field surveys. Next, we developed a geostatistical model, based on spatial interpolation (IDW), to estimate the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in unsampled locations, considering the influence of geology. Surface river waters in the Amazon show a high isotopic heterogeneity, associated with the region's geology ($p < 0.005$). Lower isotope ratios are related to waters draining more recent

* Corresponding author.

E-mail address: marcos.mdam@hotmail.com (M.A. Mereles).

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178630>

Received 20 November 2024; Received in revised form 11 January 2025; Accepted 21 January 2025

Available online 28 January 2025

0048-9697/© 2025 Elsevier B.V. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

structures, such as the sub-basins of the Andean region, while higher isotope ratios are related to waters draining older crystalline terrains, such as the Guiana and Brazilian Shields. We show a linear relationship between the predicted and observed values ($r^2 = 0.81$), demonstrating the high accuracy of the modeled data and its potential use in various other studies. The acquisition of additional $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data, along with the integration of new geospatial products, can improve estimates and accuracy in interpretations of strontium geospatial behavior in micro- and macroregions.

1. Introduction

The Amazon basin is one of the most extensive and biodiverse hydrographic networks on the planet, with a vast sedimentary plain formed over millions of years by fluvial and marine deposits (Filizola and Guyot, 2011; Tisseuil et al., 2013). Surrounded by ancient cratons, such as the Guiana Shield to the north and the Brazilian Shield to the south, as well as the Andean mountains and highland plains in the west, this geologic configuration directly influences the geochemistry and water flow rate of rivers in the region (Filizola et al., 2025). Rivers that drain crystalline terrains located to the north and south of the main river course typically carry fewer suspended sediments (Viers et al., 2008). These rivers are often referred to as 'black water' rivers, as their waters are enriched with organic molecules. In contrast, rivers draining the Andes Mountain range contain a large amount of suspended sediments due to intense erosion and are commonly known as 'white water' rivers (Filizola and Guyot, 2011). The confluence of rivers originating from the Andes with those from the cratonic regions results in a mixture of waters with distinct chemical and isotopic compositions. The understanding of the dynamics of these aquatic systems is fundamental for studies in a number of areas, such as ecology, hydrology and geology.

Studies on the origin of chemical elements have demonstrated their importance in various areas of modern science, such as the work of Licht and Hemming, 2017, that used geochemical and petrological methods to examine the provenance of glaciogenic sediments in Antarctica. Liu et al., 2018 used Pb isotopes to assess the origin of uranium in southern China. In archaeology, strontium isotopes have been applied to determine the original settlement sites and migration routes of ancient human populations from the analysis of human body hair (Ericson, 1985). Furthermore, these isotopes provide critical insights into animal mobility by analyzing isotopic signatures preserved in bone structures (Wassenaar, 2008; Wunder, 2012).

Strontium isotopes, in particular the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio, have proven to be a powerful tool for identifying the processes of mixing (Barbieri et al., 2017), sediment origin and transport (Navidtalab et al., 2024) and water-rock interactions (Frost and Toner, 2004). The Sr isotope ratio reflects the geological history of the region, varying according to the type and age of the rocks (Janzen et al., 2020). Older rocks have higher and more radiogenic isotope ratios due to the high availability of ^{87}Sr , derived from the radioactive decay of rubidium (^{87}Rb) (Nigro et al., 2017), while younger rocks have lower and less radiogenic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (Janzen et al., 2020). Dissolved Strontium and its isotopes are released into the environment through the weathering of rocks, thus becoming available for absorption across the food chain (Stewart et al., 1998). Bioavailable strontium is accumulated in animal bone tissues through diet by replacing calcium in the hydroxyapatite structure of bones, dentin, enamel, keratin, ivory, and shells (Hoppe et al., 2003) and in the aragonite structures like fish otoliths. This accumulation process records the spatial variations in the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio, which are associated with the geological history of the region, and allow the tracking of animal movements and the reconstruction of movement or migration patterns.

In the Amazon basin, stable isotopes and trace elements have been employed as biogeomarkers in rigid fish structures such as otoliths (Duponchelle et al., 2016; Garcez et al., 2014; Hauser et al., 2019; Sousa et al., 2016) and scales (Pouilly et al., 2014) to understand the life history of fish. Biogeomarkers have emerged as an alternative to traditional

techniques such as tag-recapture and telemetry and have provided important results to determine the place where fish births occurred (Garcez et al., 2014), migration routes (Hegg et al., 2015), dispersion (Sousa et al., 2016), natal homing behavior (Duponchelle et al., 2016) and the origin of commercialized fish (Pereira et al., 2019).

The expansion of the use of strontium isotopes as a geographical marker in the Amazon basin depends on a detailed mapping of the spatial variations of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio (Bowen and West, 2008). Although previous studies have provided a basis for the geochemistry of strontium in the region (Bouchez et al., 2010; Douglas et al., 1995; Gaillard et al., 1997; Goldstein and Jacobsen, 1988; Palmer and Edmond, 1992; Santos et al., 2015), providing crucial data on erosion rate, sediment transport and water-sediment interactions, the spatial coverage is still limited, given the vast extent of the basin. This gap prevents a more accurate understanding of isotopic heterogeneity in different environments and at different scales.

Studies that employ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios for animal mobility tracking rely on isotopic composition information at multiple spatial scales (Adams et al., 2019; Bataille and Bowen, 2012; Snoeck et al., 2020). Large-scale detailed sampling campaigns are expensive and often incomplete, especially in extensive ecosystems such as the Amazon (Carvalho et al., 2023). Given this, isoscapes emerge as an effective and low-cost tracer visualization technique. Isoscapes are geochemical maps of geographic isotope variability that allow modeling, interpretation, and prediction of isotopic variation patterns within systems incorporating various sources that contribute to the pool of bioavailable isotopes (Bowen et al., 2014; Silva et al., 2023; West et al., 2008; Wunder, 2010). Associating sampling campaigns on calcified structures of animals (e.g., bivalves and fish), plants and geological proxies with the development of prediction models (isoscapes) is a promising approach for mapping isotopic variation over large areas (Silva et al., 2023).

This study aims to present the first predictive map of strontium isotope ratio variations ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in the Amazon basin. For this, an integrated approach was carried out that combines an extensive compilation of data on isotopic ratio of strontium dissolved in water, measurements of strontium in fish otoliths, the geological age of rocks and a geostatistical model. This methodology allowed us to model the isotopic variability of bioavailable strontium, with an emphasis on surface waters, providing an unprecedented level of detail for the region. Initially, we constructed a prediction map based on the values of the isotope ratio that were available in the literature for the region. Subsequently, we verified whether the predicted values were correlated to the geological age of the rocks and demonstrated the applicability of the model using the predicted values to infer the places of provenance of fish based on the isotopic signature of calcified structures. The main contribution of this work is to fill gaps in the knowledge of the isotopic variability of the Amazon basin, thereby expanding the applicability of this resource in various scientific areas, such as archaeological, hydrogeological, ecological, environmental and biodiversity conservation studies, in addition to strengthening the understanding of regional geochemical processes.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The study area comprises the entire Amazon basin (Fig. 1), an

extensive area in South America of approximately 7 million km² (Venticinque et al., 2016), which covers eight countries (Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Guyana, Peru, Suriname and Venezuela). The extensive geological history of the basin, combined with its dimensions, have resulted in a heterogeneous system (Guayasamin et al., 2024; Val et al., 2022), with a complex network of rivers with distinct physico-chemical properties, which accounts for about 20 % of global freshwater discharge into the oceans (Latrubesse et al., 2017; Sioli, 2012).

This region presents the greatest freshwater biodiversity on planet Earth (Tisseuil et al., 2013). For example, freshwater Amazonian fish represent approximately 15 % of all described freshwater species in the world, with 2406 validated species (Jézéquel et al., 2020; Tedesco et al., 2017), expected >3500. During their life cycle, these species carry out migrations at different scales, including short-distance lateral migrations and longitudinal migrations of long and medium distances, through which they connect with the different parts of the basin (Duponchelle et al., 2021).

2.2. Isotopic data of ⁸⁶Sr/⁸⁷Sr in water samples and fish otoliths

A total of 190 strontium isotope ratio (⁸⁶Sr/⁸⁷Sr) site from water (Supplementary Table S1) and 37 from fish otoliths were compiled from the scientific literature, 15 from *Arapaima gigas*, 4 from *Hoplias malabaricus*, 14 from *Brachyplatystoma rousseauxii* and 4 from *Cithla temensis*. It was assumed that the values of the edge of the otoliths (Supplementary Table S2) correspond to the isotopic signature (see methodology in Pouilly et al., 2014) of the place where the fish was caught (Fig. 1).

A total of 15 new samples of water isotopic ratios, collected in

November 2019, were incorporated into the database, thus totaling 205 points distributed in different river course sites throughout the Amazon basin (Fig. 1). Water samples were collected at a depth of 40 cm using polyethylene containers (2 L) cleaned with 10 % nitric acid (HNO₃), considering the opposite direction to the current to avoid possible influences from the vessel's engine. After collection, the samples were filtered with 0.22 µm cellulose acetate filters (47 mm diameter) using a pressurized filtration unit (Sartorius Teflon). The filtered water samples were stored in polypropylene bottles washed with acid and acidified with ultrapure HNO₃ until analysis. The proportions of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr in water samples were determined at the Geochronos Laboratory of the University of Brasília, Brazil (UnB) by means of a multicollector mass spectrometer (ICPMS), according to Santos et al. (2015).

2.3. Data analysis

The coordinates of each location were extracted and converted to the plane coordinate system “Albers projection IBGE - USER:10000”. Spatial interpolation was performed using the inverse distance-weighted (IDW) method and the gstat package (Pebesma, 2004). This method employs a distance-weighted linear combination based on statistical and mathematical methods to create surfaces and calculate predictions of unmeasured points (Jones et al., 2003). The isotopic ratios were estimated at a spatial resolution of 1 km.

Thematic maps were prepared using the multiscale GIS structure (BL2 Amazon basins >100,000 km²) provided by Venticinque et al. (2016). The interpolation was delimited from the wetland areas of the Amazon basin (Hess et al., 2015). In addition, geological data from the

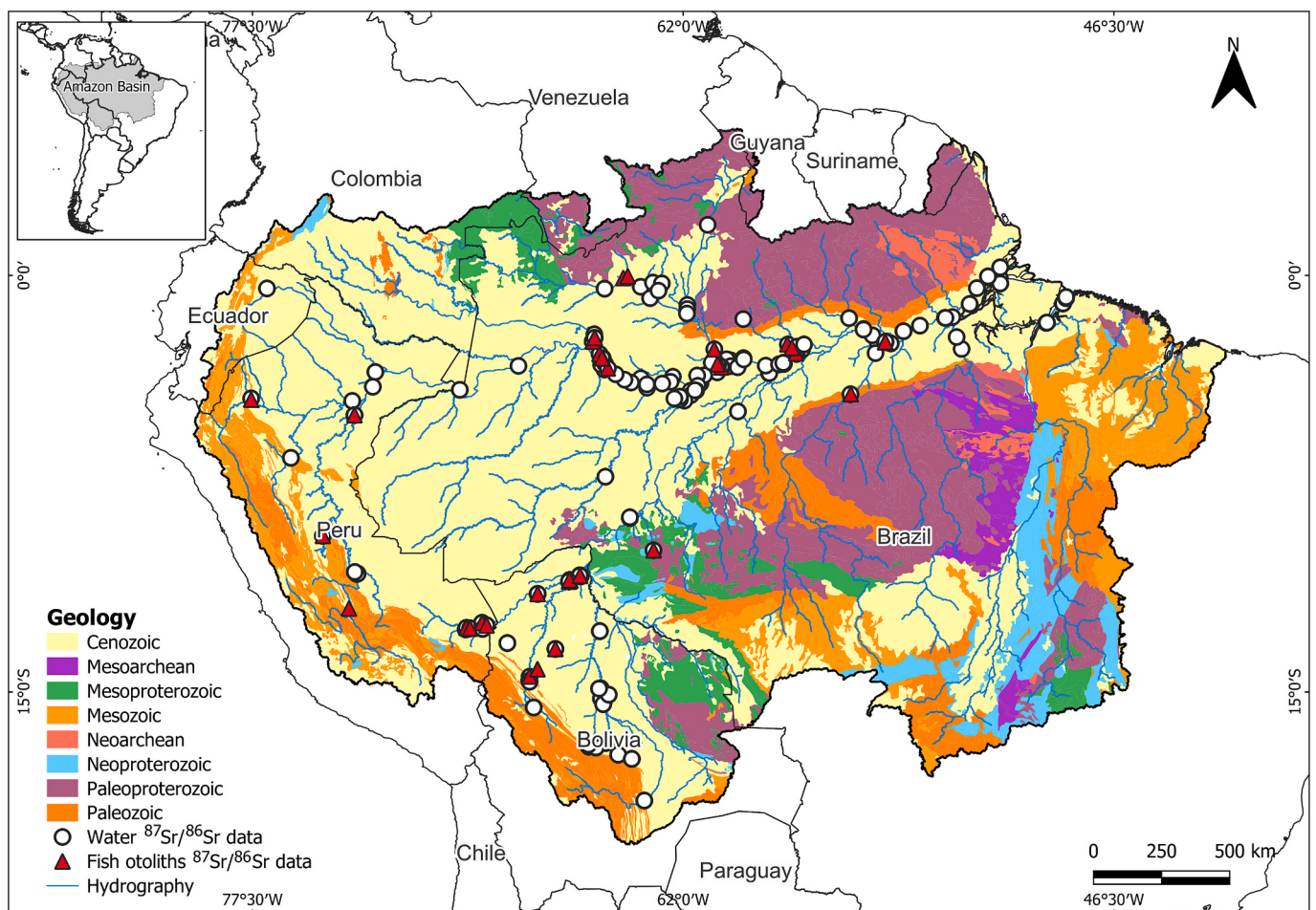


Fig. 1. Distribution of sampling points (water samples and fish otoliths) in geological formations in the Amazon basin. In the inside legend change distribution by water/fish samples.

International Chronostratigraphic Chart (Cohen et al., 2013) was used to determine the age of this geological structure. The age of each sub-basin (BL2) was estimated as the age-weighted mean of the geological structures within these areas.

A simple linear regression model was used to evaluate the relationship between the mean geological age (predictor variable) and the estimated mean strontium isotope values (response variable) of the sub-basins. A second model was performed to evaluate the accuracy of the interpolation. For this, a linear regression was performed between the estimated isotopic values, as a predictor variable, and the values of the edge of the otoliths of the five fish species as a response variable.

The assumptions of normality and homogeneity of the variances were analyzed using the Shapiro-Wilk and Breusch-Pagan tests, respectively. Cook's distance (Cook, 1977) was used to detect outliers. Interpolation and statistical analysis were performed in the R software (R Core Team, 2023) using the `lmtest` (Zeileis and Hothorn, 2002), `sjPlot` (Ludecke et al., 2015) and `ggplot2` (Villanueva and Chen, 2019) packages and the elaboration of maps in QGIS (QGIS 3.32.2, 2023).

3. Results

The isotope ratios of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in the surface waters of the Amazon basin showed high heterogeneity, with a range of values from 0.70590 to 0.77198 (Table 1, Fig. 2). The lowest isotopic ratios were associated with sub-basins originating in Andean regions and in the retro-arc basin, post-Andean, (e.g., Juruá, Purus and Ucayali). Sub-basins draining areas with a mixture of volcanic and sedimentary rocks have intermediate isotopic ratios (e.g., Madeira, Abacaxis). In contrast, sub-basins that drain old geologic terrains, such as the Guiana Shield and the Brazilian Shield (e.g., Tocantins, Trombetas and Xingu sub-basins), display the highest isotopic ratios (Table 1, Fig. 2).

Table 1

Mean values, standard deviations (mean $\pm$ SD), maxima (Max) and minima (Min) estimates of the isotopic ratios of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for the Amazonian sub-basins. ID: corresponds to the numerical identification of the sub-basins.

ID	Sub-basins	Mean $\pm$ SD	Max	Min
1	Abacaxis	0.72058 $\pm$ 0.00841	0.73694	0.71018
2	Amazon floodplain	0.71364 $\pm$ 0.00564	0.74901	0.70595
3	Coastal basins North	0.71189 $\pm$ 0.00102	0.71575	0.71155
4	Coastal basins South	0.71440 $\pm$ 0.00211	0.71851	0.71260
5	Içá – Putumayo	0.70785 $\pm$ 0.00197	0.71249	0.70590
6	Japurá – Caquetá	0.70759 $\pm$ 0.00224	0.71363	0.70590
7	Javari	0.70855 $\pm$ 0.00042	0.70926	0.70745
8	Juruá	0.70968 $\pm$ 0.00110	0.71189	0.70833
9	Madeira	0.72015 $\pm$ 0.00354	0.73395	0.70902
10	Marañón	0.70836 $\pm$ 0.00042	0.70891	0.70591
11	Minor Amazon tribs Curuá-Una	0.73360 $\pm$ 0.01255	0.75499	0.71731
12	Minor Amazon tribs Guama	0.71753 $\pm$ 0.00192	0.71854	0.71336
13	Minor Amazon tribs Jari	0.71590 $\pm$ 0.00615	0.72822	0.71117
14	Minor Amazon tribs Jutai	0.71122 $\pm$ 0.00101	0.71252	0.70915
15	Minor Amazon tribs Madeirinha	0.71813 $\pm$ 0.00798	0.73395	0.70900
16	Minor Amazon tribs Manacapuru	0.70888 $\pm$ 0.00017	0.70926	0.70864
17	Minor Amazon tribs Nanay	0.70772 $\pm$ 0.00057	0.70848	0.70639
18	Minor Amazon tribs Pacajá	0.74248 $\pm$ 0.01165	0.75119	0.71105
19	Minor Amazon tribs Piorini	0.70950 $\pm$ 0.00075	0.71241	0.70910
20	Minor Amazon tribs Tefe	0.71010 $\pm$ 0.00042	0.71188	0.70897
21	Minor Amazon tribs Uatumbã	0.72087 $\pm$ 0.00657	0.73561	0.71013
22	Napo	0.70629 $\pm$ 0.00046	0.70716	0.70590
23	Negro	0.72922 $\pm$ 0.01113	0.77199	0.70592
24	Purus	0.71239 $\pm$ 0.00299	0.72462	0.70875
25	Tapajós	0.72862 $\pm$ 0.00845	0.75825	0.71480
26	Tocantins	0.73685 $\pm$ 0.01045	0.74915	0.71852
27	Trombetas	0.72546 $\pm$ 0.00428	0.73426	0.71029
28	Ucayali	0.70868 $\pm$ 0.00072	0.71377	0.70811
29	Xingu	0.74123 $\pm$ 0.00682	0.75516	0.71148

In addition to the variations between sub-basins, variations within sub-basins are also evident. In the areas where there are confluences of rivers with different isotopic compositions (e.g., Tapajós and Amazon River; Xingu and Amazon River), high heterogeneity was observed, with these mixing zones causing a gradient from west to east of the Solimões/Amazon River (Fig. 2).

The regression indicated the effect of geological age on the estimated values of the Sr isotope ratio ($F = 9.62$, $df = 1, 26$, $p < 0.005$). However, a low proportion of variation explained by the model ($R^2 = 0.27$) was observed, probably due to the high variability of isotopic values in structures with more recent formations, e.g., Minor Amazon tribs Pacajá (mean of 0.74248) and Minor Amazon tribs Manacapuru (mean of 0.70888) (Fig. 3).

Fig. 4 compares the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio at the edge of otoliths, which corresponds to the fish capture site, and the isotope ratio of water in the same site based on our interpolated model. It shows a significant linear relationship between these two parameters ($r^2 = 0.81$, $F = 154.1$, $df = 1, 35$, $p < 0.001$).

4. Discussion

The results presented here provide a first isoscape of the bioavailable strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio for the entire Amazon basin, as an initial step to characterize this sparsely sampled region. Isotopic variations between sub-basins reflect the influence of local geologic formations, with lower strontium ratios for younger and Andes derived rocks, such as the Amazon River floodplain and other whitewater rivers, and higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of older crystalline geologic terrains (e.g., Trombetas River and Xingu River). We also highlight the occurrence of a longitudinal gradient of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotope ratio in the floodplain of the Amazon River in the west, with lower values and, to the east, with higher values.

The variations observed in strontium isotopic signatures ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in the Amazonian sub-basins reflect geological diversity and the contribution of suspended sediments. The relationship between the isotope ratio and geology is well established in other major basins, such as that of the Mississippi and Fraser River, where the age of the rock substrate correlates positively with the values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Peucker-Ehrenbrink et al., 2010). This pattern has also been observed in previous studies in the Amazon basin, which associated the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio with the age and composition of geological formations (Gaillardet et al., 1997; Santos et al., 2015). This relationship is explained by the radioactive decay of ^{87}Rb into ^{87}Sr over geological time (half-life of 48.8 billion years), resulting in older rocks with higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values, due to the accumulation of radiogenic ^{87}Sr (Faure and Powell, 2012; Long, 1998). However, this relationship can be influenced by weathering, erosion and sediment deposition processes (Allègre et al., 1996; Brown and Miller, 1969), which may explain the high variability of predicted values in regions with younger structures, where weathering is more intense.

Understanding the spatial variability of strontium isotope signatures in the Amazon allows one to trace the provenance of sediments and reconstruct the geological history of the region. Sub-basins that drain Andes-derived sediments and rocks, such as Içá-Putumayo and Japurá-Caquetá, reflect the contribution of the Sr isotopic composition of volcanic rocks present in these areas. These rivers provide sediments with low Sr isotopic ratios because of the lower $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of these rocks. Sub-basins such as the Madeira and Abacaxis show intermediate isotopic ratios, reflecting the mixing of sediments from different geological sources, including Andean rocks and Amazonian sedimentary deposits. Sub-basins such as Trombetas, Tapajós and Xingu reflect the contribution of older geologic terrains, such as the Guyana Shield and the Brazilian Shield. Rocks of these old terrains have high values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ due to the long geological history and high concentration of rubidium (Santos et al., 2015).

The Madeira sub-basin exhibits higher Sr isotopic ratios and

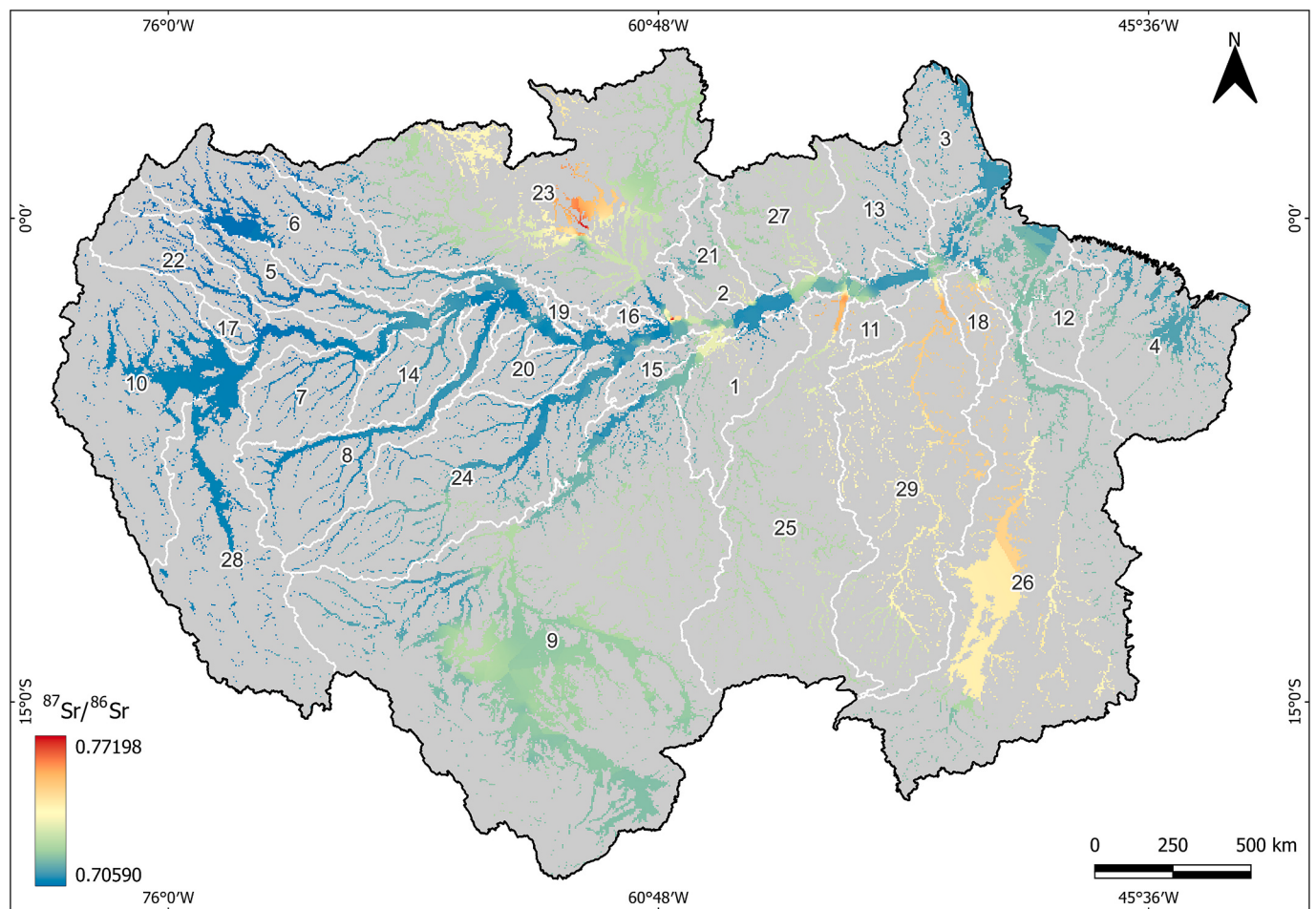


Fig. 2. Distribution of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in the Amazon basin based on compiled dissolved Sr isotope data. The color scale represents the variation in the strontium isotope ratio throughout the basin. The numbers represent the sub-basins described in Table 1.

significant seasonal variations compared to other sub-basins of Andean origin. The higher isotope ratios are related to the contribution of tributaries that drain the western part of the Brazilian Shield, a region that is mainly characterized by ancient rocks of the Precambrian basement, as is the case of the Guaporé River, one of the main tributaries of the Madeira (Gaillardet et al., 1997; Pouilly et al., 2014). Seasonal variation, in turn, is the result of rock erosion and the interaction between water and sediments (Santos et al., 2015). During the rainy season there is a change in the sediment source or an increase in physical weathering, favoring the entry of more radiogenic sediments (Santos et al., 2015). Viers et al. (2008) observed that when the suspended load is at its maximum, the isotopic composition becomes more radiogenic. On the other hand, when the load of suspended sediments is minimal, the isotopic composition becomes less radiogenic.

A similar pattern is observed in the west-east gradient of the Amazon River, with values increasing as it receives sediment discharge along its middle and lower reaches, from tributaries such as the Madeira and Solimões Rivers, which have an influence from ten kilometers downstream from the confluences (Bouchez et al., 2010; Santos et al., 2015). This heterogeneity, combined with temporal and spatial variations, demonstrates the complexity of the processes that control the isotopic distribution of Sr in the basin (Santos et al., 2015; Viers et al., 2008). This indicates the need for more detailed studies to understand the influence of different sources and geological processes on the isotopic composition of Amazonian waters.

The main factors for the observed pattern of isotopic distribution in the Amazon basin are the geology of the source regions of the rivers and their tributaries. However, this pattern can be altered by other

environmental and anthropogenic factors (Evans et al., 2012). The increase in anthropized areas, with the use of agricultural lime, fertilizers, animal feed and pesticides can significantly reduce the isotopic ratios when dissolved in surface waters (Thomsen and Andreasen, 2019). Sub-basins such as those of the Tapajós, Xingu and Madeira Rivers show constant increases in activities such as deforestation, mining, damming, agriculture and intensive agriculture (Castello and Macedo, 2016a; Franco et al., 2024; Morgado et al., 2023), which in the long term could alter the bioavailable isotopes of these areas. Deforestation and mining, for example, alter the dynamics of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio by modifying the processes of weathering, erosion, and transport of Sr between land surface compartments. Removing forest cover exposes the soil directly to rain and surface runoff, thereby increasing the rate of chemical weathering of minerals, while mining intensifies the exposure of deep layers of the Earth's crust that have different Sr isotopic compositions to those of the surface (Castello and Macedo, 2016). These possible changes in strontium isotopic composition would have implications for the development of baseline maps of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and for use in provenance and migration studies.

The significant relationship found between the Sr values predicted from water and those measured in otoliths suggests good accuracy of the modeled data. These results indicate that the calcified structures recorded the same $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ signal from the water, suggesting the absence of biological isotopic fractionation of Sr, which was observed in other studies (Avigliano et al., 2020; Pouilly et al., 2014; Campana, 1992). Otoliths are often considered useful markers for the study of the life cycle of fish, since strontium concentrations reflect the aquatic environment with a ratio close to 1:1 (Campana, 1992; Campana and

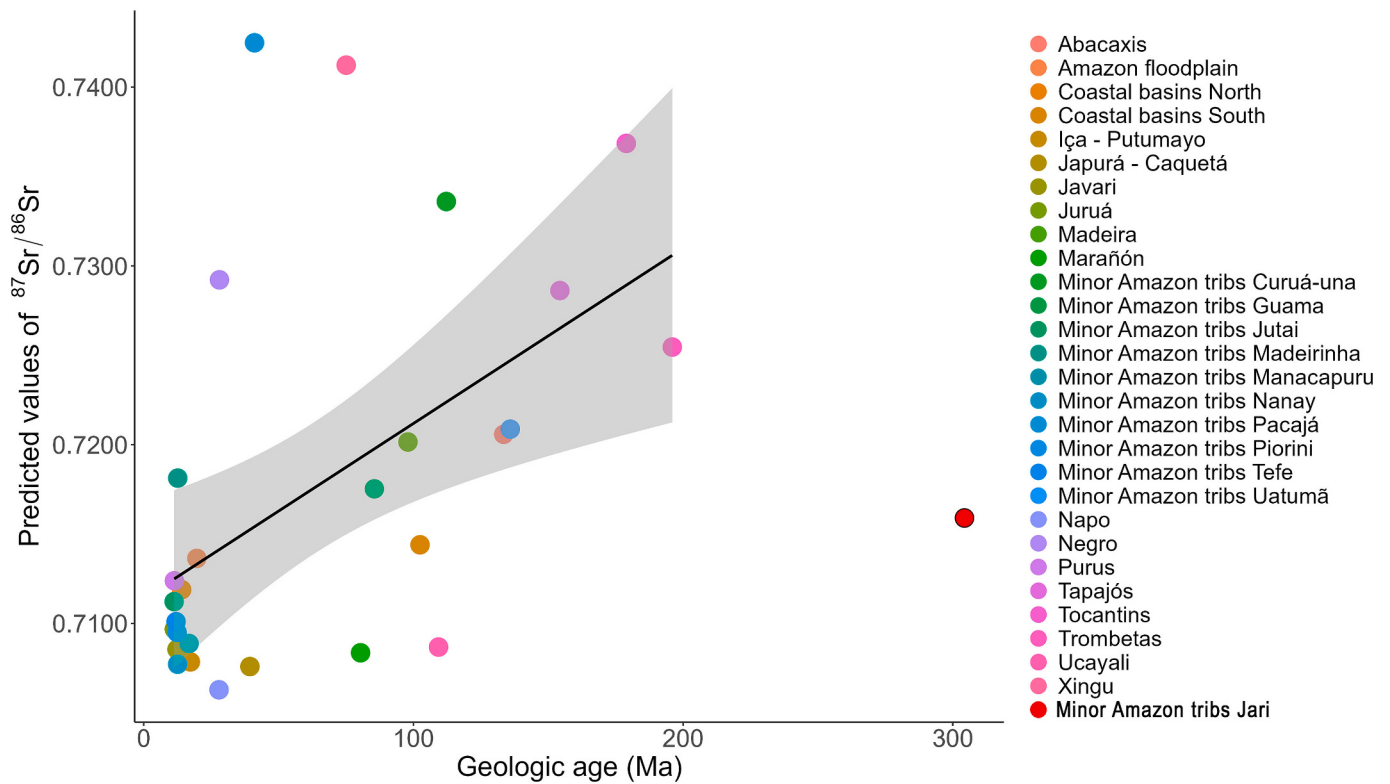


Fig. 3. Linear relationship between estimated values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and geologic age of the Amazon basin. The red circle is an outlier. Shading corresponds to the 95 % confidence interval.

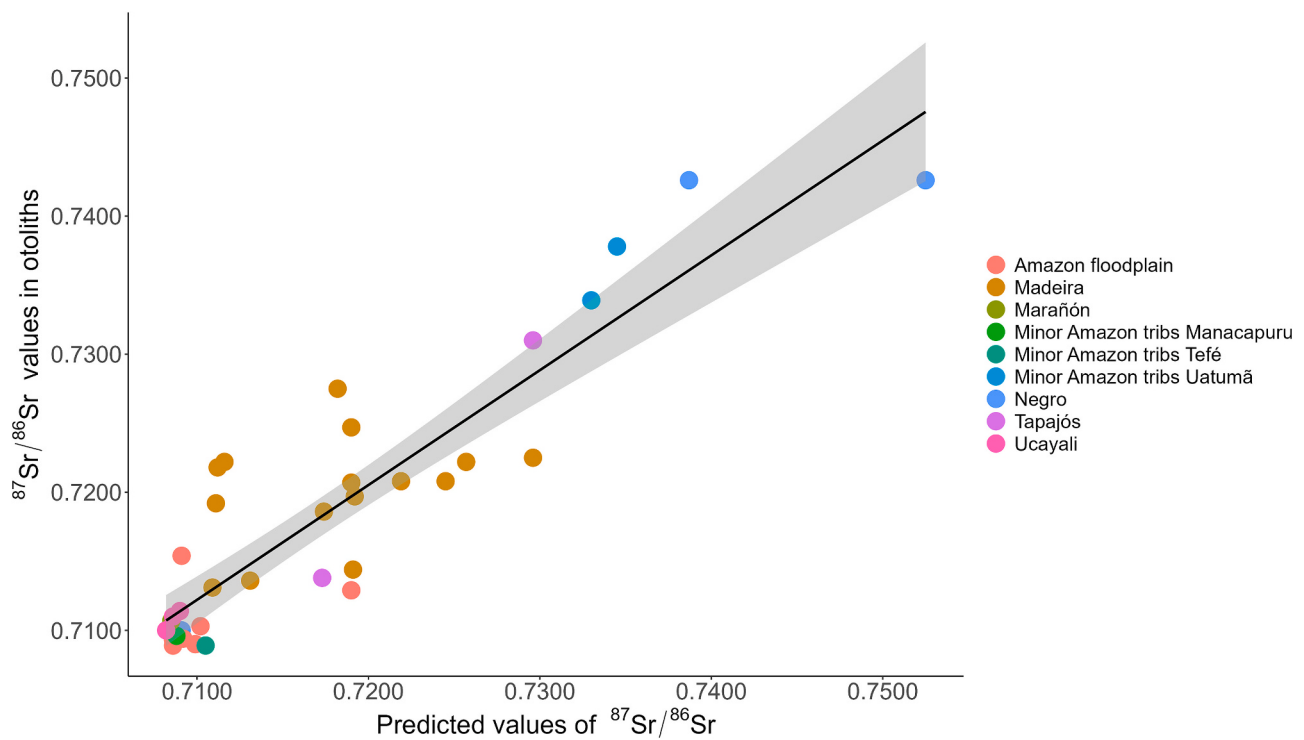


Fig. 4. Linear relationship between estimated values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and edge values of fish otoliths of the Amazon basin. Shading corresponds to the 95 % confidence interval.

Thorrold, 2001; Pouilly et al., 2014; Zitek et al., 2023). Thus, the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios represent an important biogeochemical tag that can be used in the complex Amazon basin due to the contrasting ratios of

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ between sub-basins. The identification of essential sites for the life cycle of species can aid in the planning of ecological corridors that maintain or restore connectivity between habitats that are essential to

the rich ichthyofauna of the region, especially for species that migrate across international borders, species under intense fishing pressure or those sensitive to climate change (Alho et al., 2015; Duponchelle et al., 2016).

The baseline provided in this article permits the understanding of isotopic dynamics in the Amazon basin, and offers a tool for monitoring and evaluating various aspects of aquatic ecosystems, and can assist in the formulation of management strategies. It can be highlighted, for example, that areas with distinct isotopic signatures may be associated with specific ecological habitats, aquatic ecotones, including spawning grounds or areas of high biological productivity (Avigliano et al., 2021; Höpker et al., 2022). By combining this data with on-site information about biodiversity, it is possible to identify priority areas for conservation. Moreover, since the isoscape largely reflects local geology, areas with significant variations in estimated isotopic values may indicate regions affected by intense anthropogenic activities, such as mining and dam construction (Hegg et al., 2015, 2013). These indicators of changes in local geochemical characteristics, associated with changes in sediment flows and the cycle of elements, may function as a useful indicator for the agencies responsible for environmental monitoring.

The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isoscape is a promising approach to improve the studies of animal origin and mobility in the Amazon basin. However, applying the predictive models at a macroscale, in a hyper-diverse and poorly sampled environment, needs continuous improvements. The accuracy of the present study can be improved through the integration of data from other regions not yet sampled, development of online repositories to store bioavailable data and potentially model variations on smaller spatial scales, as well as insert these data into the functions of predictive models related to isotopic variations arising from the seasonality of the environments.

5. Conclusion

This study provides the first comprehensive spatial distribution of the strontium isotope ratio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in surface waters of the Amazon basin and reveals the variations between sub-basins that are influenced by the geological history of the basin. The strong correlation between predicted and measured values demonstrates the usefulness of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio as a powerful indicator for understanding the origins and movements of animals, identifying key habitats, and monitoring the impacts of human activities on Amazonian ecosystems. However, the current isoscape represents a first approximation, and future research should focus on: (1) incorporating seasonal and year-by-year variability in isotopic composition, (2) expanding sampling efforts to under-sampled regions such as tributaries and headwaters, and (3) integrating environmental covariates such as precipitation, flow and land use to improve the model's predictions. Taking into account these limitations, this study fills significant gaps in the knowledge of the isotopic variability of the Amazon basin and provides a basis for future research on the biogeochemistry of the region, with diverse applications, such as ecological, fisheries management and environmental impact assessment studies.

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178630>.

CRediT authorship contribution statement

Marcos de Almeida Mereles: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Software, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. **Raniere Garcez Costa Sousa:** Writing – review & editing, Supervision, Conceptualization. **Marc Pouilly:** Writing – review & editing, Supervision. **Diego Valente Pereira:** Writing – review & editing, Validation, Methodology, Formal analysis, Data curation. **Gisellen Lima Mc Comb:** Writing – review & editing, Supervision. **Naziano Filizola:** Writing – review & editing, Supervision. **Roberto Ventura Santos:** Writing – review & editing,

Validation. **Carlos Edwar de Carvalho Freitas:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Formal analysis, Data curation, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: Has patent pending to. If there are other authors, they declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

We thank the Graduate Program in Animal Science and Fishery Resources (PPGCARP) for the opportunity to carry out this study. To Chiara Lubich, for her help in preparing the graphical abstract. Government of the State of Amazonas through the Research Support Foundation of the State of Amazonas with the granting of a scholarship to D.V.P. and M.A. M. To CNPq, which granted a scholarship to C.E.C.F. (process 303685/2019-0). The Federal University of Amazonas (UFAM) for providing us with its structure. Campus France for making academic mobility possible at the M.A.M. for the South-North Mobility program in partnership with the Institut de Recherche pour le Développement (IDR).

Data availability

I have shared the link to my data

[Strontium Isoscape \(\$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}\$ \) in Surface Water from the Amazon Basin \(Original data\)](#) (Mendeley Data)

References

- Adams, S., Grün, R., McGahan, D., Zhao, J., Feng, Y., Nguyen, A., Willmes, M., Quaresimin, M., Lobsey, B., Collard, M., Westaway, M.C., 2019. A strontium isoscape of north-east Australia for human provenance and repatriation. *Geochronology* 34, 231–251. <https://doi.org/10.1002/gea.21728>.
- Alho, C.J.R., Reis, R.E., Aquino, P.P.U., 2015. Amazonian freshwater habitats experiencing environmental and socioeconomic threats affecting subsistence fisheries. *Ambio* 44, 412–425. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0610-z>.
- Allègre, C.J., Dupré, B., Nègre, P., Gaillardet, J., 1996. Sr-Nd-Pb isotope systematics in Amazon and Congo River systems: constraints about erosion processes. *Chem. Geol.* 131, 93–112. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(96\)00028-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(96)00028-9).
- Avigliano, E., Pouilly, M., Bouchez, J., Domanico, A., Sánchez, S., Llamazares Vegh, S., Clavijo, C., Scarabotti, P., Facetti, J.F., Caffetti, J.D., del Rosso, F.R., Pecheyran, C., Béral, S., Volpedo, A.V., 2020. Strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) reveal the life history of freshwater migratory fishes in the La Plata Basin. *River Res. Appl.* 36, 1985–2000. <https://doi.org/10.1002/rra.3727>.
- Avigliano, E., Pisonero, J., Bouchez, J., Pouilly, M., Domanico, A., Sánchez, S., Clavijo, C., Scarabotti, P., Facetti, J.F., Caffetti, J.D., del Rosso, F.R., Llamazares Vegh, S., Volpedo, A.V., 2021. Otolith Sr/Ca ratio complements Sr isotopes to reveal fish migration in large basins with heterogeneous geochemical landscapes. *Environ. Biol. Fish.* 104, 277–292. <https://doi.org/10.1007/s10641-021-01074-y>.
- Barbieri, M., Nigro, A., Petitta, M., 2017. Groundwater mixing in the discharge area of San Vittorino Plain (Central Italy): geochemical characterization and implication for drinking uses. *Environ. Earth Sci.* 76, 393. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6719-1>.
- Bataille, C.P., Bowen, G.J., 2012. Mapping $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in bedrock and water for large scale provenance studies. *Chem. Geol.* 304–305, 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.01.028>.
- Bouchez, J., Lajeunesse, E., Gaillardet, J., France-Lanord, C., Dutra-Maia, P., Maurice, L., 2010. Turbulent mixing in the Amazon River: the isotopic memory of confluences. *Earth Planet. Sci. Lett.* 290, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.11.054>.
- Bowen, G.J., West, J.B., 2008. Isotope Landscapes for Terrestrial Migration Research, pp. 79–105. [https://doi.org/10.1016/S1936-7961\(07\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S1936-7961(07)00004-8).
- Bowen, G.J., Liu, Z., Vander Zanden, H.B., Zhao, L., Takahashi, G., 2014. Geographic assignment with stable isotopes in IsoMAP. *Methods Ecol. Evol.* 5, 201–206. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12147>.
- Brown, P.E., Miller, J.A., 1969. Interpretation of isotopic ages in orogenic belts. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 3, 137–155. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1969.003.01.08>.
- Campana, S.E., 1992. Measurement and interpretation of the microstructure of fish otoliths. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 117, 59–71.

- Campana, S.E., Thorrold, S.R., 2001. Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58, 30–38. <https://doi.org/10.1139/cj00-177>.
- Carvalho, R.L., Resende, A.F., Barlow, J., França, F.M., Moura, M.R., Maciel, R., Alves-Martins, F., Shutt, J., Nunes, C.A., Elias, F., Silveira, J.M., Stegmann, L., Baccaro, F. B., Juen, L., Schietti, J., Aragão, L., Berenguer, E., Castello, L., Costa, F.R.C., Guedes, M.L., Leal, C.G., Lees, A.C., Isaac, V., Nascimento, R.O., Phillips, O.L., Schmidt, F.A., ter Steege, H., Vaz-de-Mello, F., Venticinque, E.M., Vieira, I.C.G., Zuanon, J., Ferreira, J., Carvalho, R.L., Resende, A.F., Barlow, J., França, F., Moura, M.R., Maciel, R., Alves-Martins, F., Shutt, J., Nunes, C.A., Elias, F., Silveira, J. M., Stegmann, L., Baccaro, F.B., Juen, L., Schietti, J., Aragão, L., Berenguer, E., Castello, L., Costa, F.R.C., Guedes, M.L., Leal, C.G., Lees, A.C., Isaac, V., Nascimento, R.O., Phillips, O.L., Schmidt, F.A., ter Steege, H., Vaz-de-Mello, F., Venticinque, E.M., Vieira, I.C.G., Zuanon, J., Ferreira, J., Geber Filho, A.N. dos S., Ruschel, A., Calor, A.R., de Lima Alves, A., Muelbert, A.E., Quaresma, A., Vicentini, A., Piedade, A.R. da, Oliveira, A.A. de, Aleixo, A., Casadei-Ferreira, A., Gontijo, A., Hercos, A., Andriolo, A., Lopes, A., Pontes-Lopes, A., Santos, A.P.M. dos, Oliveira, A.B. da S. de, Mortati, A.F., Salcedo, A.K.M., Albernaz, A.L., Fares, A.L., Andrade, A.L., Oliveira, P.A.M., Faria, A.P.J., Batista, A.P.B., Puker, A., Bueno, A. S., Junqueira, A.B., Holanda de Andrade, A.L.R., Ghidini, A.R., Galuch, A.V., Menezes, A.S.O. de, Manzatto, A.G., Correa, A.S.A.S., Queiroz, A.C.M., Zanzini, A.C. da S., Olivo Neto, A.M., Melo, A.W.F. de, Guimarães, A.F., Castro, A.B., Borges, A., Ferreira, A.B., Marimon, B.S., Marimon-Junior, B.H., Flores, B.M., de Resende, B.O., Albuquerque, B.W., Villa, B., Davis, B., Nelson, B., Williamson, B., Melo, B.S.B. de, Cintra, B.B.L., Santos, B.B., Prudente, B. da S., Luiz, B.G., Godoy, B.S., Rutt, C.L., Duarte Ritter, C., Silva, C.V.J., Ribas, C.R., Peres, C.A., Azevêdo, C.A.S. de, Freitas, C., Cordeiro, C.L., Brocardo, C.R., Castilho, C., Levis, C., Doria, C.R. da C., Arantes, C.C., Santos, C.A. dos, Jakovac, C.C., Silva, C.A., Benetti, C.J., Lasmay, C., Marsh, C.J., Andretti, C.B., Oliveira, C.P. de, Cornelius, C., Alves da Rosa, C., Baider, C., Gualberto, C.G., Deus, C.P. de, Monteiro Jr., C. da S., Santos Neto, C.R. dos, Lobato, C.M.C., Santos, C.R.M. dos, Penagos, C.C.M., Costa, D. da S., Vieira, D.L. M., Aguiar, D.P.P. de, Veras, D.S., Pauletto, D., Braga, D. de L., Storck-Tonon, D., Almeida, D. da F., Douglas, D., Amaral, D.D. do, Gris, D., Luther, D., Edwards, D.P., Guimarães, D.P., Santos, D.C. dos, Campana, D.R. de S., Nogueira, D.S., Silva, D.R. da, Dutra, D.B. de S., Rosa, D.C.P., Silva, D.A.S. da, Pedroza, D., Anjos, D.V., Melo Lima, D.V., Silvério, D.V., Rodrigues, D. de J., Bastos, D., Daly, D., Barbosa, E.M., Arenas, E.R.C., Oliveira, E.A. de, Santos, E.A. dos, Santana, E.C.C. de, Guilherme, E., Vidal, E., Campos-Filho, E.M., van den Berg, E., Morato, E.F., da Silva, E.R., Marques, E.E., Pringle, E.G., Nichols, E., Andresen, E., Farias, E. de S., Siqueira, E.L. S. de, Albuquerque, E.Z., Görgens, E.B., Cunha, E.J.R. da, Householder, E., Novo, E.M.M. de L., Oliveira, F.F. de, Roque, F. de O., Coletti, F., Reis, F., Moreira, F. F.F., Todeschini, F., Carvalho, F.A., Coelho de Souza, F., Silva, F.A.B., Carvalho, F.G., Cabeciera, F.G., d'Horta, F.M., Mendonça, F.P., Florêncio, F.P., Carvalho, F.R. de, Arruda, F.V. de, Nonato, F.A. da S., Santana, F.D., Durgante, F., Souza, F.K.S. de, Obermuller, F.A., Castro, F.S. de, Wittmann, F., Sales, F.M. da S., Neto, F.V., Salles, F. F., Borba, G.C., Damasco, G., Barros, G.G., Brejão, G.L., Jardim, G.A., Prance, G.T., Lima, G.R., Desidério, G.R., Melo, G. da C. de, Carmo, G.H.P. do, Cabral, G.S., Rousseau, G.X., da Silva, G.C., Schwartz, G., Griffiths, H., Queiroz, H.L. de, Espírito-Santo, H.M.V., Cabette, H.S.R., Nascimento, H.E.M., Vasconcelos, H.L., Medeiros, H., Aguiar, H.J.A.C. de, Leão, H., Wilker, I., Gonçalves, I.C., de Sousa Grayeb, I., Miranda, I.P. de A., Brown, I.F., Santos, I.C.S., Fernandes, I.O., Fernandes, I., Delabie, J.H.C., de Abreu, J.C., Gama Neto, J. de L., Costa, J.B.P., Noronha, J.C., de Brito, J.G., Wolfe, J., Santos, J.C., Ferreira-Ferreira, J., e Gomes, J.O., Lasky, J.R., de Faria Falcão, J.C., Costa, J.G., Cravo, J.S., Guerrero, J.E.B., Muñoz Gutiérrez, J.A., Carreiras, J., Lanna, J., Silva Brito, J., Schöngart, J., Mendes Aguiar, J.J., Lima, J., Barroso, J.G., Noriega, J.A., Pereira, J.L. da S., Nessimian, J.L., Souza, J.L.P. de, de Toledo, J.J., Magalhães, J.L.L., Camargo, J.L., Oliveira, J.M.B., Ribeiro, J.M.F., Silva, J.O. de A., da Silva Guimarães, J.R., Hawes, J.E., Andrade-Silva, J., Revilla, J. D.C., da Silva, J.S., da Silva Menger, J., Rechetelo, J., Stropp, J., Barbosa, J.F., do Vale, J.D., Louzada, J., Cerqueira Silva, J.C., da Silva, K.D., Melgaço, K., Carvalho, K. S., Yamamoto, K.C., Mendes, K.R., Vulinec, K., Maia, L.F., Cavalheiro, L., Vedovatto, L.B., Demarchi, L.O., Giacomini, L., Dumas, L.L., Maracahipes, L., Brasil, L. S., Ferreira, L.V., Calvão, L.B., Maracahipes-Santos, L., Reis, L.P., da Silva, L.F., de Oliveira Melo, L., Carvalho, L.C. da S., Casatti, L., Amado, L.L., de Matos, L.S., Vieira, L., Prado, L.P. do, Alencar, L., Fontenele, L., Mazzei, L., Navarro Paolucci, L., Zanzini, L.P., Carvalho, L.N., Crema, L.C., Brulinger, L.F.B., Montag, L.F. de A., Naka, L.N., Azara, L., Silveira, L.F., Nunes, L.G. de O., Rosalino, L.M. do C., Mestre, L. A.M., Bonates, L.C. de M., Coelho, L. de S., Borges, L.H.M., Lourenço, L. da S., Freitas, M.A.B., Brito, M.T. da S., Pombro, M.M., da Rocha, M., Cardoso, M.R., Guedes, M.C., Raseira, M.B., Medeiros, M.B. de, Carim, M. de J.V., Simon, M.F., Pansonato, M.P., dos Anjos, M.R., Nascimento, M.T., Souza, M.R. de, Monteiro, M.G. T., da Silva, M.J., Uehara-Prado, M., Oliveira, M.A. de, Callisto, M., Vital, M.J.S., Santos, M.P.D., Silveira, M., Oliveira, M.V.N.D., Pérez-Mayorga, M.A., Carniello, M. A., Lopes, M.A., Silveira, M.A.P. de A., Esposito, M.C., Maldaner, M.E., Passos, M.I.S., Anacleto, M.J.P., Costa, M.K.S., Martins, M.P., Piedade, M.T.F., Irueme, M.V., Costa, M.M.S. da, Maximiano, M.F. de A., Freitas, M.G., Cochrane, M.A., Gastauer, M., Almeida, M.R.N., Souza, M.F. de, Catarino, M., Costa Batista, M., Massam, M.R., Martins, M.F. de O., Holmgren, M., Almeida, M., Dias, M.S., Espírito Santo, N.B., Benone, N.L., Ivanauskas, N.M., Medeiros, N., Targhetta, N., Félix, N.S., Ferreira, N., Hamada, N., Campos, N., Giehl, N.F. da S., Metcalf, O.C., Silva, O.G.M. da, Cerqueira, P.V., Moser, P., Miranda, P.N., Perquetti, P.S.F., Alverga, P.P. de P., Prist, P., Souto, P., Brando, P., Pompeu, P. dos S., Barni, P.E., Graça, P.M. de A., Morandi, P.S., Cruz, P.V., da Silva, P.G., Bispo, P.C., Camargo, P.B. de, Sarmiento, P. S. de M., Souza, P., Andrade, R.B. de, Braga, R.B., Boldrini, R., Bastos, R.C., Assis, R. L. de, Salomão, Rafael, P., Leitão, R.P., Mendes, R.N.G., Carpanedo, R. de S., Melinski, R.D., Ligeiro, R., e Pérez, R.E.P., Barbosa, R.L., Cajaiha, R.L., Silvano, R.A. M., Salomão, Renato Portela, Hilário, R.R., Martins, R.T., Perdiz, R. de O., Vicente, R. E., Silva, R.J. da, Koroiva, R., Solar, R., Silva, R. da C., s de Lima, R.B., Silva, R. dos S. A. da, Mariano, R., Ribeiro, R.A.B., Fadini, R.F., Oliveira, R.L.C. de, Feitosa, R.M., Matavelli, R., Mormul, R.P., da Silva, R.R., Zanetti, R., Barthem, R., Almeida, R.P.S., Ribeiro, S.C., r Costa Neto, S.V. da, Nienow, S., Oliveira, S.A.V. de, Borges, S.H., Milheiras, S., Ribeiro, S.P., Couceiro, S.R.M., Sousa, S.A. de, Rodrigues, S.B., Dutra, S.L., Mahood, S., Vieira, S.A., Arrolho, S., Silva, S.S. da, Triana, S.P., Laurance, S., Kunz, S.H., Alvarado, S.T., Rodrigues, T.H.A., Santos, T.F. dos, Machado, T.L. da S., Feldpausch, T.R., Sousa, T., Michelan, T.S., Emilio, T., Brito, T. de F., André, T., Barbosa, T.A.P., Miguel, T.B., Izzo, T.J., Laranjeiras, T.O., Mendes, T.P., Silva, T.S.F., Krolow, T.K., Begot, T.O., Baker, T.R., Domingues, T.F., Giarrizzo, T., Bentos, T.V., Haugaasen, T., Peixoto, U., Pozzobom, U.M., Korasaki, V., Ribeiro, V.S., Scudeller, V.V., Oliveira, V.H.F., Landeiro, V.L., Santos Ferreira, V.R., Silva, V. de N.G., Gomes, V.H.F., Oliveira, V.C. de, Firmino, V., Santiago, W.T.V., Beiroz, W., Almeida, W.R. de, Oliveira, W.L. de, Silva, W.C. da, Castro, W., Dáttilo, W., Cruz, W.J.A. da, Silva, W.F.M. da, Magnusson, W.E., Laurance, W., Milliken, W., Paula, W.S. de, Malhi, Y., Shimabukuro, Y.E., Lima, Y.G. de, Shimano, Y., Feitosa, Y., 2023. Pervasive gaps in Amazonian ecological research. *Curr. Biol.* 33, 3495–3504.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.06.077>.
- Castello, L., Macedo, M.N., 2016. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* 22, 990–1007. <https://doi.org/10.1111/gcb.13173>.
- Cohen, K.A., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.-X., 2013. The ICS international chronostratigraphic chart. *Episodes* 36, 199–204. <https://doi.org/10.18814/epiuijournals/2013/v36i3/002>.
- Cook, R.D., 1977. Detection of influential observation in linear regression. *Technometrics* 19, 15–18.
- Duponchelle, F., Pouilly, M., Pécuyer, C., Hauser, M., Renno, J., Panfil, J., Darnaude, A.M., Garcia-Vasquez, A., Carvajal-Vallejos, F., García-Dávila, C., 2016. Trans-Amazonian natal homing in giant catfish. *J. Appl. Ecol.* 53, 1511–1520.
- Duponchelle, F., Isaac, V.J., Da Costa, Rodrigues, Doria, C., Van Damme, P.A., Herrera-R., G.A., Anderson, E.P., Cruz, R.E.A., Hauser, M., Hermann, T.W., Agudelo, E., Bonilla-Castillo, C., Barthem, R., Freitas, C.E.C., García-Dávila, C., García-Vasquez, A., Renno, J., Castello, L., 2021. Conservation of migratory fishes in the Amazon basin. *Aquat. Conserv.* 31, 1087–1105. <https://doi.org/10.1002/aqc.3550>.
- Ericson, J.E., 1985. Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology. *J. Hum. Evol.* 14, 503–514. [https://doi.org/10.1016/S0047-2484\(85\)80029-4](https://doi.org/10.1016/S0047-2484(85)80029-4).
- Evans, J.A., Chenery, C.A., Montgomery, J., 2012. A summary of strontium and oxygen isotope variation in archaeological human tooth enamel excavated from Britain. *J. Anal. At. Spectrom.* 27, 754. <https://doi.org/10.1039/c2ja10362a>.
- Faure, G., Powell, J.L., 2012. *Strontium Isotope Geology*. Springer Science & Business Media.
- Filizola, N., Guyot, J.L., 2011. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências* 41, 566–576. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414566576>.
- Filizola, N., Marinho, R., Freitas, C., Ribas, C., Zuanon, J., Fearnside, P., Moreira-Turcq, P., 2025. Amazonas. In: *Rivers of South America*. Elsevier, pp. 213–237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823429-7.00004-5>.
- Franco, V. dos S., Lima, A.M.M. de, Oliveira, R.R.S. de, Souza, E.B. de, Sodré, G.R.C., Santos, D.C., Adami, M., Serrão, E.A. de O., Dias, T.S. da S., 2024. Anthropogenic activity in the topo-climatic interaction of the Tapajós River Basin, in the Brazilian Amazon. *Hydrology* 11, 82. <https://doi.org/10.3390/hydrology11060082>.
- Frost, C.D., Toner, R.N., 2004. Strontium isotopic identification of water-rock interaction and ground water mixing. *Groundwater* 42, 418–432. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02689.x>.
- Gaillardet, J., Dupre, B., Allegre, C.J., Négrel, P., 1997. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chem. Geol.* 142, 141–173. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00074-0).
- Garcez, R.C.S., Humston, R., Harbor, D., Freitas, C.E.C., 2014. Otolith geochemistry in young-of-the-year peacock bass *Cichla temensis* for investigating natal dispersal in the Negro River (Amazon - Brazil) river system. *Ecol. Freshw. Fish* 24, 242–251. <https://doi.org/10.1111/eff.12142>.
- Guayasamin, J.M., Ribas, C.C., Carnaval, A.C., Carrillo, J.D., Hoorn, C., Lohmann, L.G., Riff, D., Ulloa Ulloa, C., Albert, J.S., 2024. Evolution of Amazonian biodiversity: a review. *Acta Amazon.* 54. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202103601>.
- Hauser, M., Doria, C.R.C., Santos, R.V., Garcia-Vasquez, A., Pouilly, M., Pécuyer, C., Ponzevera, E., Torrente-Vilara, G., Bérail, S., Panfil, J., 2019. Shedding light on the migratory patterns of the Amazonian goliath catfish, *Brachyplatystoma platynemum*, using otolith $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ analyses. *Aquat. Conserv.* 29, 397–408.
- Hegg, J.C., Kennedy, B.P., Fremier, A.K., 2013. Predicting strontium isotope variation and fish location with bedrock geology: understanding the effects of geologic heterogeneity. *Chem. Geol.* 360, 89–98.
- Hegg, J.C., Giarrizzo, T., Kennedy, B.P., 2015. Diverse early life-history strategies in migratory Amazonian catfish: implications for conservation and management. *PLoS One* 10, 1–19.
- Hess, L.L., Melack, J.M., Affonso, A.G., Barbosa, C., Gastil-Buhl, M., Novo, E.M.L.M., 2015. Wetlands of the lowland Amazon Basin: extent, vegetative cover, and dual-season inundated area as mapped with JERS-1 synthetic aperture radar. *Wetlands* 35, 745–756. <https://doi.org/10.1007/s13157-015-0666-y>.
- Höpker, S.N., Wu, H.C., Lucassen, F., Sadio, O., Brochier, T., Nuworp, I.Y., Kasemann, S.A., Merschel, P., Westphal, H., 2022. Sr isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in water and fish otoliths as estuarine salinity tracers: case studies from three NW African Rivers. *Estuar. Coasts* 45, 1780–1802. <https://doi.org/10.1007/s12237-021-01041-x>.

- Hoppe, K.A., Koch, P.L., Furutani, T.T., 2003. Assessing the preservation of biogenic strontium in fossil bones and tooth enamel. *Int. J. Osteoarchaeol.* 13, 20–28. <https://doi.org/10.1002/oa.663>.
- Janzen, A., Bataille, C., Copeland, S.R., Quinn, R.L., Ambrose, S.H., Reed, D., Hamilton, M., Grimes, V., Richards, M.P., le Roux, P., Roberts, P., 2020. Spatial variation in bioavailable strontium isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in Kenya and northern Tanzania: implications for ecology, paleoanthropology, and archaeology. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 560, 109957. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109957>.
- Jézéquel, C., Tedesco, P.A., Bigorne, R., Maldonado-Ocampo, J.A., Ortega, H., Hidalgo, M., Martens, K., Torrente-Vilara, G., Zuanon, J., Acosta, A., Agudelo, E., Barrera Maure, S., Bastos, D.A., Bogotá Gregory, J., Cabeceira, F.G., Canto, A.L.C., Carvajal-Vallejos, F.M., Carvalho, L.N., Cella-Ribeiro, A., Covain, R., Donascimento, C., Dória, C.R.C., Duarte, C., Ferreira, E.J.G., Galuch, A.V., Giarrizzo, T., Leitão, R.P., Lundberg, J.G., Maldonado, M., Mojica, J.L., Montag, L.F.A., Ohara, W.M., Pires, T.H.S., Pouilly, M., Prada-Pederos, S., de Queiroz, L.J., Rapp Py-Daniel, L., Ribeiro, F.R.V., Ríos Herrera, R., Sarmiento, J., Sousa, L.M., Stegmann, L.F., Valdiviezo-Rivera, J., Villa, F., Yunoki, T., Oberdorff, T., 2020. A database of freshwater fish species of the Amazon Basin. *Sci. Data* 7, 96. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0436-4>.
- Jones, N.L., Davis, R.J., Sabbah, W., 2003. A comparison of three-dimensional interpolation techniques for plume characterization. *Groundwater* 41, 411–419. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2003.tb02375.x>.
- Latrubesse, E.M., Arima, E.Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V.R., Horta, F.M., Wight, C., Wittmann, F., Zuanon, J., Baker, P.A., Ribas, C.C., Norgaard, R.B., Filizola, L.J., 2017. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nat. Publ. Group* 546, 363–369. <https://doi.org/10.1038/nature22333>.
- Licht, K.J., Hemming, S.R., 2017. Analysis of Antarctic glacial sediment provenance through geochemical and petrologic applications. *Quat. Sci. Rev.* 164, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.03.009>.
- Liu, J., Luo, X., Wang, J., Xiao, T., Yin, M., Belshaw, N.S., Lippold, H., Kong, L., Xiao, E., Bao, Z., Li, N., Chen, Y., Linghu, W., 2018. Provenance of uranium in a sediment core from a natural reservoir, South China: application of Pb stable isotope analysis. *Chemosphere* 193, 1172–1180. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.131>.
- Long, L.E., 1998. Rubidium-Strontium Method, in: *Geochemistry*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 556–561. https://doi.org/10.1007/1-4020-4496-8_279.
- Ludecke, D., Bartel, A., Schwemmer, C., Powell, C., Djalovski, A., Titz, J., 2015. Data visualization for statistics in social science. *Comprehens. R Arch. Netw. Version: 2.8.17*. (CRAN).
- Morgado, M.G. de A., Passos, C.J.S., Garnier, J., Lima, L.A., Alcântara Mendes, R., Samson-Brais, É., Lucotte, M., 2023. Large-scale agriculture and environmental pollution of ground and surface water and sediment by pesticides in the Brazilian Amazon: the case of the Santarém region. *Water Air Soil Pollut.* 234, 150. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06152-8>.
- Navidtalab, A., Mehrabi, H., Shafaii Moghadam, H., Rahimpour-Bonab, H., 2024. Strontium isotope proxy of sedimentological records reveals uplift and erosion in the Southeastern Neo-Tethys ocean during the late Cretaceous. *Sci. Rep.* 14, 3499. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54128-3>.
- Nigro, A., Sappa, G., Barbieri, M., 2017. Strontium isotope as tracers of groundwater contamination. *Proc. Earth Planet. Sci.* 17, 352–355. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.089>.
- Pebesma, E.J., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Comput. Geosci.* 30, 683–691.
- Pereira, L.A., Santos, R.V., Hauser, M., Duponchelle, F., Carvajal, F., Pecheyran, C., Bérail, S., Pouilly, M., 2019. Commercial traceability of *Arapaima* spp. fisheries in the Amazon basin: can biogeochemical tags be useful? *Biogeosciences* 16, 1781–1797. <https://doi.org/10.5194/bg-16-1781-2019>.
- Peucker-Ehrenbrink, B., Miller, M.W., Arsouze, T., Jeandel, C., 2010. Continental bedrock and riverine fluxes of strontium and neodymium isotopes to the oceans. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 11. <https://doi.org/10.1029/2009GC002869>.
- Pouilly, M., Point, D., Sondag, F., Henry, M., Santos, R.V., 2014. Geographical origin of Amazonian freshwater fishes fingerprinted by $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios on fish otoliths and scales. *Environ. Sci. Technol.* 48, 8980–8987. <https://doi.org/10.1021/es500071w>.
- Santos, R.V., Sondag, F., Cochonneau, G., Lagane, C., Brunet, P., Hattingh, K., Chaves, J. G.S., 2015. Source area and seasonal $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in rivers of the Amazon basin. *Hydrol. Process.* 29, 187–197. <https://doi.org/10.1002/hyp.10131>.
- Silva, C., dos Santos, E.A., Dussin, I.A., Montibeller, C.C., de Avelar Las Casas Rebelo, V., da Costa Pereira Lavalle Heilbron, M., Pimentel, L.C.G., Landau, L., 2023. Spatial distribution of strontium and neodymium isotopes in South America: a summary for provenance research. *Environ. Earth Sci.* 82, 348. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-1028-5>.
- Sioli, H., 2012. *The Amazon: Limnology and Landscape Ecology of a Mighty Tropical River and its Basin*. Springer Science & Business Media.
- Snoeck, C., Ryan, S., Pouncett, J., Pellegrini, M., Claeys, P., Wainwright, A.N., Mattioli, N., Lee-Thorp, J.A., Schulting, R.J., 2020. Towards a biologically available strontium isotope baseline for Ireland. *Sci. Total Environ.* 712, 136248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136248>.
- Sousa, R.G.C., Humston, R., Freitas, C.E.C., 2016. Movement patterns of adult peacock bass *Cichla temensis* between tributaries of the middle Negro River basin (Amazonas - Brazil): an otolith geochemical analysis. *Fish. Manag. Ecol.* 23, 76–87. <https://doi.org/10.1111/fme.12166>.
- Stewart, B.W., Capo, R.C., Chadwick, O.A., 1998. Quantitative strontium isotope models for weathering, pedogenesis and biogeochemical cycling. *Geoderma* 82, 173–195.
- Tedesco, P.A., Beauchard, O., Bigorne, R., Blanchet, S., Buisson, L., Conti, L., Cornu, J.-F., Dias, M.S., Grenouillet, G., Hugueny, B., Jézéquel, C., Leprieux, F., Brosse, S., Oberdorff, T., 2017. A global database on freshwater fish species occurrence in drainage basins. *Sci. Data* 4, 170141. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.141>.
- Thomsen, E., Andreasen, R., 2019. Agricultural liming as the cause of recent strontium isotope changes in a 180-year environmental record from a Danish lake. *Geochim. Cosmochim. Acta* 5, 98–117. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.10.031>.
- Tisseuil, C., Cornu, J., Beauchard, O., Brosse, S., Darwall, W., Holland, R., Hugueny, B., Tedesco, P.A., Oberdorff, T., 2013. Global diversity patterns and cross-taxa convergence in freshwater systems. *J. Anim. Ecol.* 82, 365–376. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12018>.
- Val, P., Figueiredo, J., de Melo, G., Flantua, S.G.A., Quesada, C.A., Albert, J.S., Guayasamin, J.M., Hoorn, C., 2022. Geology and geodiversity of the Amazon: three billion years of history. In: *Science Panel for the Amazon*, pp. 1–72.
- Venticinque, E., Forsberg, B., Barthelm, R., Petry, P., Hess, L., Mercado, A., Cañas, C., Montoya, M., Durigan, C., Goulding, M., 2016. An explicit GIS-based river basin framework for aquatic ecosystem conservation in the Amazon. *Earth Syst. Sci. Data* 8, 651–661. <https://doi.org/10.5194/essd-8-651-2016>.
- Viers, J., Roddaz, M., Filizola, N., Guyot, J.-L., Sondag, F., Brunet, P., Zouiten, C., Boucayrand, C., Martin, F., Boaventura, G.R., 2008. Seasonal and provenance controls on Nd–Sr isotopic compositions of Amazon rivers suspended sediments and implications for Nd and Sr fluxes exported to the Atlantic Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.* 274, 511–523. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.08.011>.
- Villanueva, R.A.M., Chen, Z.J., 2019. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis (2nd ed.). *Measurement (Mahwah N J)* 17, pp. 160–167. <https://doi.org/10.1080/15366367.2019.1565254>.
- Wassenaar, L.I., 2008. An Introduction to Light Stable Isotopes for Use in Terrestrial Animal Migration Studies, pp. 21–44. [https://doi.org/10.1016/S1936-7961\(07\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S1936-7961(07)00002-4).
- West, J.B., Sobek, A., Ehleringer, J.R., 2008. A simplified GIS approach to modeling global leaf water isoscapes. *PLoS One* 3, e2447. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002447>.
- Wunder, M.B., 2010. Using Isoscapes to Model Probability Surfaces for Determining Geographic Origins, in: *Isoscapes*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 251–270. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3354-3_12.
- Wunder, M.B., 2012. Determining geographic patterns of migration and dispersal using stable isotopes in keratins. *J. Mammal.* 93, 360–367. <https://doi.org/10.1644/11-MAMM-S-182.1>.
- Zeileis, A., Hothorn, T., 2002. Diagnostic Checking in Regression Relationships.
- Zitek, A., Oehm, J., Schober, M., Tchaikovsky, A., Irrgeher, J., Retzmann, A., Thalinger, B., Traugott, M., Prohaska, T., 2023. Evaluating $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Sr/Ca ratios in otoliths of different European freshwater fish species as fishery management tool in an Alpine foreland with limited geological variability. *Fish. Res.* 260, 106586. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106586>.

Mereles MA, Sousa RGC, Pouilly M, Yamamoto K, Freitas CEC. Assinaturas isotópicas de estrôncia ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) revelam padrão de residência e dispersões ocasionais para o tucunaré-açu (*Cichla temensis*) em afluentes do Médio Rio Negro.

Assinaturas isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ revelam padrão de residência e dispersões ocasionais para o tucunaré-açu (*Cichla temensis*) em afluentes do Médio Rio Negro

Marcos de Almeida Mereles^{1*}; Raniere Garcez Costa Sousa²; Marc Pouilly³; Kedma Yamamoto⁴; Carlos Edwar de Carvalho Freitas⁴

¹Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-graduação em Ciência Animal e Recursos Pesqueiros, Av. General Rodrigo Octávio, 6200, Coroado II, 69077-000 Manaus, AM, Brazil. (MAM) marcos.mdam@hotmail.com (*autor correspondente)

²Departamento de Geografia, Universidade Federal de Rondônia, Rod. BR 364, Km 9,5, Porto Velho, RO, CEP: 76801-059, Brazil.

³Institut de Recherche Pour le Développement. Laboratoire BOREA, Museum National d'Histoire Naturelle de Paris, 61, Rue Buffon, 75005 Paris, France.

⁴Universidade Federal do Amazonas, Av. General Rodrigo Otávio, 3000, Coroado II, 69077-000 Manaus, AM, Brazil.

Resumo:

Informações sobre os movimentos reais dos peixes, a conectividade de habitat e a estrutura populacional são escassas para a maioria das espécies em ambiente amazônico, especialmente para aquelas de elevada importância econômica e ecológica, como o *Cichla temensis*. Diante disso, este estudo investigou os padrões de movimento do tucunaré-açu (*Cichla temensis*) em afluentes do médio Rio Negro (Amazônia, Brasil), utilizando assinaturas isotópicas de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) em otólitos e água. Foram coletadas amostras de água e otólitos de 79 indivíduos em seis sub-bacias, durante o período de águas baixas. As análises revelaram heterogeneidade isotópica significativa entre os afluentes, com valores mais baixos nos rios Cuiuni e Caurés, tributários na margem direita do rio Negro), e mais elevados no rio Aracá, tributário da margem esquerda. A relação linear entre as razões isotópicas da água e dos otólitos ($R^2 = 0,95$) confirmou a robustez do método para rastrear movimentos. A maioria dos indivíduos (64) apresentou padrão de residência, permanecendo nas sub-bacias de origem. A análise de transectos nos otólitos identificou alguns eventos de movimentação entre sub-bacias (ex. Aracá-Demeni), sugerindo a existência de corredores ecológicos. Conclui-se que a conectividade hidrológica é essencial para a manutenção da diversidade genética e resiliência populacional, especialmente frente a pressões antrópicas. Recomenda-se a continuidade de estudos em escalas temporais ampliadas e a priorização de

habitats críticos em planos de manejo. Este trabalho destaca a importância de abordagens isotópicas para a conservação de espécies-chave em ecossistemas amazônicos.

Palavras-chave: Tucunaré-acú; residência; conectividade; isótopos de estrôncio; otólitos.

Isotopic signatures of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ reveal residence pattern and occasional dispersions for the tucunaré-açú (*Cichla temensis*) in tributaries of the Middle Negro River

Abstract:

Information on actual fish movements, habitat connectivity and population structure is scarce for most species in the Amazon environment, especially for those of high economic and ecological importance, such as *Cichla temensis*. This study investigated the movement patterns of the tucunaré-açú (*C. temensis*) in tributaries of the middle Rio Negro (Amazonia, Brazil), using strontium isotopic signatures ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in otoliths and water. Water and otolith samples were collected from 79 individuals in six sub-basins during the low water period. The analyses revealed significant isotopic heterogeneity between the tributaries, with lower values in the Cuiuni and Caurés rivers, tributaries on the right bank of the Negro River, and higher values in the Aracá River, a tributary on the left bank. The linear relationship between the isotopic ratios of water and otoliths ($R^2 = 0.95$) confirmed the robustness of the method for tracking movements. Most of the individuals (64) showed a residence pattern, remaining in the sub-basins of origin. The analysis of otolith transects identified some movement events between sub-basins (e.g. Aracá-Demeni), suggesting the existence of ecological corridors. We conclude that hydrological connectivity is essential for maintaining genetic diversity and population resilience, especially in the face of anthropogenic pressures. It is recommended that studies be continued at longer time scales and that critical habitats be prioritized in management plans. This work highlights the importance of isotopic approaches for the conservation of key species in Amazonian ecosystems.

Key-words: Tucunaré-acú; residence; connectivity; strontium isotopes; otoliths.

INTRODUÇÃO

Elucidar a dinâmica espacial e os padrões de migração e dispersão das espécies de peixes é essencial para identificar habitats fundamentais de desova, forrageamento e refúgio, bem como para delinear as origens das populações (Closs et al., 2016; Lucas, Barras, 2008). Além disso, quantificar a frequência e a extensão espacial dos movimentos entre rios é indispensável para embasar estratégias eficazes de conservação e de gestão pesqueira, sobretudo em cenários marcados por pressões antropogênicas e mudanças hidrológicas decorrentes das alterações climáticas (Crook et al., 2015; Duponchelle et al., 2021). Portanto, gargalos migratórios ocasionados por barreiras naturais ou artificiais podem fragmentar populações, resultando em declínios na diversidade genética e na resiliência (Liermann et al., 2012; Ribolli et al., 2021). Na ausência de homogeneização dos estoques, a pressão de pesca localizada tende a afetar apenas as populações residentes, com efeitos de transbordamento limitados sobre os estoques adjacentes em escalas espaciais mais amplas (Olden et al., 2004; Smith, Whitledge, 2010). Esse panorama ressalta a necessidade de abordagens de manejo em toda a bacia, integrando a ecologia do movimento e a heterogeneidade dos habitats, de modo a mitigar a exploração excessiva e a estocasticidade ambiental (Herrera-R et al., 2024).

Na bacia Amazônica, os peixes exibem uma diversidade de comportamentos migratórios e/ou de dispersão (Duponchelle et al., 2021), intrinsecamente associados aos processos reprodutivos e de alimentação (Herrera-R et al., 2024). Sazonalmente diversas espécies migram lateralmente entre rios e lagos de várzea para explorar os recursos alimentares das áreas inundadas (Ribeiro, Petrere, 1990; Röpke et al., 2024), enquanto outras realizam migrações longitudinais em busca de condições ideais de desova, que, em alguns casos, podem ser caracterizados como comportamento de *natal homing* (Batista, Alves-Gomes, 2006; Duponchelle et al., 2016).

A dinâmica espacial das populações de tucunaré-açu *Cichla temensis* continua a ser um tema controverso. Alguns trabalhos, como os de Sousa et al. (2016), sugerem que populações do médio rio Negro permanecem restritos a determinados ambientes ao longo da sua vida. Enquanto outros propuseram que esses peixes podem realizar deslocamentos expressivos, com registros de movimentos que ultrapassam 40 km entre habitats distintos (Hoeinghaus et al., 2003; Holley et al., 2008). No entanto, nesses estudos não foram considerados fatores como a biogeoquímica da região do habitat, que poderiam influenciar

na movimentação dos peixes (Stoffers et al., 2022). Sendo possível que variações espaciais no gradiente dos afluentes e outras variáveis físico-químicas influenciem o comportamento do movimento de *Cichla* (Willis et al., 2010; Winemiller et al., 2008).

O *C. temensis* é um recurso de grande relevância econômica e ecológica na região amazônica (Freitas, Rivas, 2006; Inomata, Freitas, 2015; Thomé-Souza et al., 2014). Estudos recentes mostram que o *C. temensis* está entre as espécies de peixes mais capturadas na região do médio rio Negro, sendo a principal espécie alvo da pesca esportiva (Holley et al., 2008; Lubich et al., 2023). Além disso, desempenha um papel de grande importância ecológica, como predador de topo da cadeia alimentar, regulando diversos ambientes aquáticos (Aguiar-Santos et al., 2018; Jepsen et al., 1997). No entanto, a intensa pressão pesqueira tem provocado uma redução do tamanho médio dos indivíduos e o declínio no rendimento das capturas (Lubich et al., 2021). Essa vulnerabilidade à sobrepesca pode desencadear impactos significativos nas cascatas tróficas dos ecossistemas locais (Willis et al., 2015; Winemiller, 2001). Dessa forma, é crucial entender os padrões de movimentação das populações de *C. temensis* para desenvolver estratégias de manejo eficazes, visando a manutenção e a conservação da espécie em seus diversos habitats.

Acompanhar individualmente os trajetos migratórios dos peixes em sistemas fluviais amazônicos apresenta desafios logísticos significativos, devido à grande extensão dos rios e à dificuldade de captura dos indivíduos. Nas últimas décadas, a microquímica de otólitos, tem se mostrado uma alternativa eficaz para a reconstrução de rotas migratórias dos peixes (Duponchelle et al., 2016; Hauser et al., 2019; Hegg et al., 2015; Hermann et al., 2016; Pereira et al., 2019; Pouilly et al., 2014). Elementos químicos como isótopos de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) são incorporados nos otólitos de acordo com a disponibilidade no ambiente (Walther, Thorrold, 2006). O otólito, por ser uma estrutura metabolicamente inerte, preserva um registro temporal dos ambientes pelos quais os peixes passaram, o que permite reconstruir habitats passados e presentes (Campana, Thorrold, 2001). Até o momento, não foi observado nenhum fracionamento de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre a água e o otólito dos peixes, independentemente de fatores como espécie, tamanho ou temperatura (Avigliano et al., 2020). Isso torna a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ uma ferramenta eficaz para investigar padrões de migração em sistemas de água doce com características geológicas variadas. Como a composição de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na água está diretamente relacionada à idade e ao tipo de rochas presentes na área drenada (Mereles et al., 2025), a diversidade geológica de uma bacia hidrográfica determina a utilidade desse

geomarcador como um indicador confiável para inferir a origem geográfica e os deslocamentos dos peixes (Hegg et al., 2013; Jens C. Hegg et al., 2015; Kennedy et al., 2000).

Este estudo investigou os padrões de movimentação de *Cichla temensis* (tucunaré-açu) em tributários do médio rio Negro, analisando a relação entre as assinaturas microquímicas registradas nos otólitos dos indivíduos e em amostras de água dos ambientes de captura dos peixes. Os objetivos específicos foram: (a) estabelecer uma linha de base para os valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nas sub-bacias do médio Rio Negro e (b) verificar se os indivíduos permanecem nos mesmos tributários ao longo do ciclo de vida (padrão de residência) ou realizam deslocamentos para outras sub-bacias. Nossa hipótese é que a heterogeneidade isotópica da água é um fator que influencia a movimentação de *C. temensis*. Esperávamos que os peixes de áreas com baixos valores isotópicos tendessem a ser mais residentes, enquanto aqueles de áreas com altos valores isotópicos apresentassem maior movimentação. Acreditamos que os resultados contribuam para elucidar os padrões de movimento de *C. temensis*, permitindo identificar os habitats críticos para o seu ciclo de vida. Essas informações são particularmente relevantes para o estabelecimento de estratégias de gestão dos estoques pesqueiros explorados por diversas modalidades de pesca na região. Além disso, o estudo esclarece a dependência de *C. temensis* à conectividade entre os habitats aquáticos marginais aos grandes rios amazônicos, considerando suas rotas de dispersão e as áreas essenciais para seu ciclo de vida.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia do médio Rio Negro, em afluentes localizados no município de Barcelos-AM (Figura 1). Essa região é caracterizada por diferentes formações geológicas, onde os tributários da margem esquerda do rio Negro percorrem por camadas geológicas mais antiga da cobertura Cenozoica, enquanto os rios da margem direita são provenientes da formação Amazonas-Solimões, recebendo forte influência da bacia sedimentar do Solimões (Latrubesse, Franzinelli, 2005). Esse mosaico geológico influencia na composição físico-química dos tributários, resultando em diferentes tipos de água, variando de preta a branca e turva (Garcez et al., 2014). Esses tributários foram selecionados

devido à alta intensidade de pesca esportiva e comercial, principalmente sobre a espécie alvo da pesquisa, o tucunaré-açu *C. temensis* (Lopes, Freitas, 2019; Lubich et al., 2023).

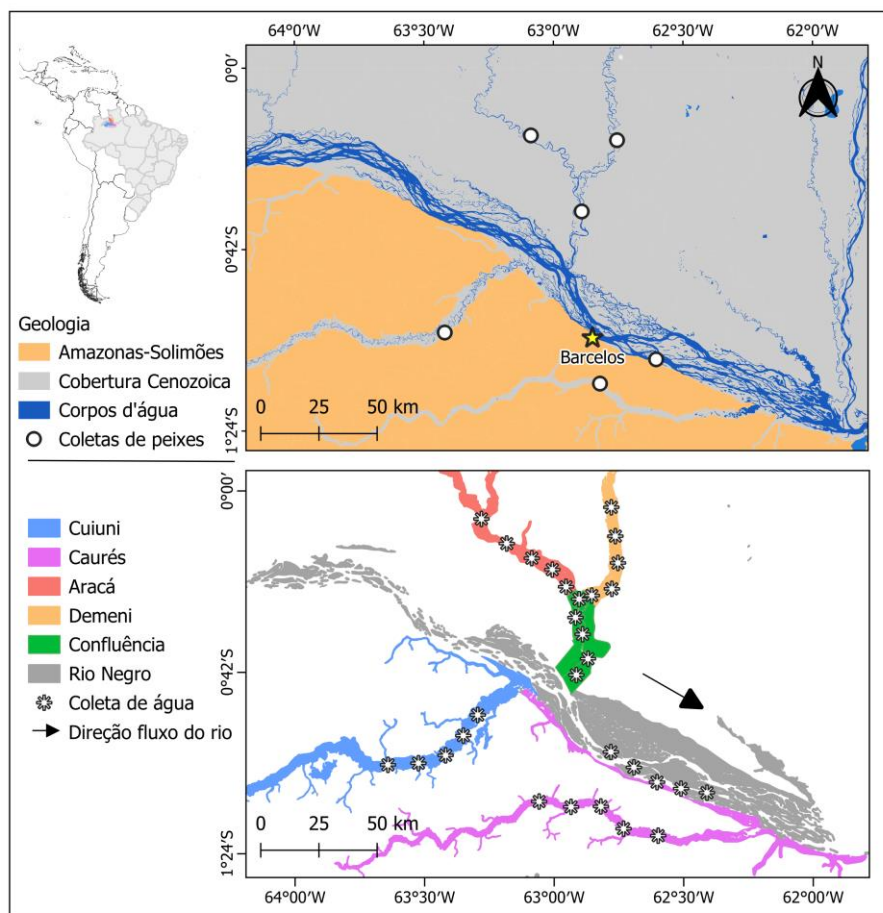


Figura 1. Localização dos pontos amostrais na região do médio Rio Negro, no município de Barcelos e a geologia da área circundante.

Coleta dos dados

A coleta de espécimens de *C. temensis* foi realizada por meio de pescarias experimentais, utilizando molinete e carretilha, em seis áreas distribuídas ao longo do rio Negro e em dois tributários da margem direita (Cuiuni e Caurés) e dois da esquerda margem (Aracá e Demeni) e a um ponto na região de confluência entre os rios Aracá e Demeni (Figura 3). As amostragens ocorreram no período de águas baixas, em novembro de 2022, sob o protocolo de licença 25606-2 do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio.

Os exemplares coletados foram submetidos a eutanásia, pelo método de secção na medula espinhal, para obtenção de dados biológicos. Posteriormente, os peixes foram acondicionados em caixas de isopor com gelo para serem processados ainda em campo. De cada exemplar capturado, foram tomadas as medidas de comprimento padrão (cm) e o peso total (g), por meio de um ictiômetro e balança de precisão (0,01g), respectivamente. Também foi feita a sexagem dos indivíduos através de observação macroscópica das gônadas, conforme descrito por Vazzoler, (1996) para espécies de peixes sedentárias.

Posteriormente, os otólitos (*sagittae*) da cavidade auricular de cada espécimen foi extraído com o auxílio de equipamentos cirúrgicos (bisturi e pinça). Após a extração, os otólitos foram lavados em solução aquosa de peróxido de hidrogênio H_2O_2 a 30% por um período de 30 segundos. Em seguida, cada otólito foi enxaguado três vezes em água deionizada ultrapura. Depois, os otólitos foram armazenados a seco em tubos de *ependorf*, etiquetados e enviados ao laboratório de Ecologia Pesqueira da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), onde foram preparados para as análises dos isótopos. Todos os procedimentos de processamento do material e coleta, foram realizados mediante a aprovação do comitê de ética da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, sob o N°. 046/2018 e conforme recomendação do Guia Brasileiro de Boas Práticas em Eutanásia em Animais - Conceitos e Procedimentos Recomendados (2012).

Para avaliar a influência da composição isotópica da água ($^{87}Sr/^{86}Sr$) na formação dos otólitos, foram coletadas três amostras de água em cada ponto amostral. Além disso, foi utilizado a base de razão isotópica de Sr disponibilizada por Mereles et al. (2025), para maximizar o número de amostras e complementar os locais onde não foram amostrados. As amostras coletadas em campo, foram recolhidas usando recipientes de polietileno (2 L) limpos com ácido nítrico (HNO_3) a 10%, a uma profundidade de 40 cm, considerando o sentido oposto à correnteza da água para evitar possíveis contaminações do motor da embarcação. Posteriormente as amostras foram identificadas e acondicionadas em um isopor com gelo para serem transportadas ao Laboratório de Geoquímica da Universidade Federal do Amazonas, onde ocorreu a preparação para as análises isotópicas.

Preparação e análises dos isótopos ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) nas amostras de otólito e água

Os otólitos foram montados em resina epóxi Araldite, em seguida, foram cortados em uma seção frontal de aproximadamente 0,7 mm de espessura com uma serra Isomet de baixa velocidade, obtendo-se dessa forma uma fatia dorso-ventral incluindo o núcleo do otólito. A seção do otólito foi polida usando papéis de polimento (1.200 e 2.400 μm) e água ultrapura até que o núcleo estivesse visível de um lado, conforme detalhado em Duponchelle *et al.* (2016).

As análises dos isótopos de Sr nos otólitos dos tucunarés foram realizadas no Laboratoire de Chimie de l'ENS de Lyon, França, usando um MC-ICPMS de alta resolução a plasma Nu (Nu instruments, Wrexham, Reino Unido) acoplado a um sistema de ablação a laser Alfamet femtosegundo (fs) (Nexeya SA, Canejan, França). Um feixe de laser foi empregado para traçar um transecto do núcleo (local de nascimento do peixe) para a borda (local de captura do peixe) do otólito, perpendicular aos anéis de crescimento, a uma velocidade de 5 $\mu\text{m s}^{-1}$. O laser foi operado a 500 Hz com uma energia de pulso de 8 μJ para limitar a ablação em profundidade a não mais que 30 μm , enquanto o scanner fazia um movimento permanente de ida e volta de 200 μm de largura a uma velocidade de 1 mm s^{-1} . Para evitar o efeito de explosão no núcleo do otólito, a ablação foi iniciada a 200 μm antes do núcleo.

As amostras de água foram filtradas com filtros de acetato de celulose de 0,22 μm (47 mm de diâmetro), usando uma unidade pressurizada de filtração de Teflon para retirada da matéria orgânica. Em seguida, as amostras foram acidificadas e armazenadas em garrafas de polipropileno de 500 ml, para serem transportadas ao Laboratório de Estudos Geocronológicos, Geodinâmicos e Ambientais da Universidade de Brasília (UnB), onde foram realizadas as análises de suas concentrações geoquímicas.

As razões isotópicas foram determinadas por espectrometria de massa por termoionização (N-TIMS), utilizando um espectrômetro Thermo Scientific Triton. Para cada amostra de 500 ml de água (filtrados e acidificados) o volume foi reduzido por evaporação até a obtenção de 50 ng de estrôncio, o que correspondeu a um volume final de 15 a 20 ml da amostra original. O resíduo resultante foi então dissolvido em 1 ml de ácido nítrico 2N, e os isótopos foram separados por cromatografia de troca iônica, utilizando resina Eichrom Sr-

Spec®. A precisão das análises foi avaliada por meio da análise do padrão internacional NBS 987, cujo valor de referência é $0,710243 \pm 1$.

Análise dos dados

Os dados foram submetidos a estatística descritiva para cálculos de frequência, média e desvio padrão (Zar, 2010). Para identificar as diferenças significativas nas razões isotópicas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da água entre os locais amostrados, foi realizado o teste de Kruskal-Wallis, uma vez que os dados não atendiam às suposições de normalidade e homocedasticidade. Quando os efeitos significativos foram identificados, comparações pareadas usando teste post-hoc de Dunn foi utilizada para verificar quais grupos diferiam entre si.

Para explorar a similaridade entre as amostras da razão isotópicas das águas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, foi realizada a uma análise de cluster baseada no método Unweighted Pair Group (UPGMA) e distâncias euclidianas sem classificação prévia. O número de clusters foi avaliado usando o aspecto visual do dendrograma e o Coeficiente de Correlação Cofenética (CPCC) foi empregado para verificar a qualidade do agrupamento (Rohlf, 1988).

Uma regressão linear foi utilizada para verificar a relação entre os isótopos de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) medidos nos diferentes locais com os valores da borda dos otólitos. Para avaliar se os indivíduos transitavam entre as sub-bacias ou permaneciam no mesmo habitat, foi realizada uma inspeção visual da variação de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ao longo dos transectos do núcleo do otólito até a borda em comparação com a razão isotópica da água. Ainda, foram relacionadas as informações sobre o sexo dos indivíduos capturados para explicar possíveis comportamentos de cada indivíduo no ambiente.

Para testar a hipótese de que a heterogeneidade ambiental determina a movimentação de peixes (ativos ou residentes), foi calculado a porcentagem da variabilidade otolítica/ambiental dos isótopos de estrôncio (POEVSri), baseado na equação proposta por Rosa et al. (2023):

$$\text{POEVSri} = \frac{(\text{Máximo} - \text{Mínimo otólito } ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) \times 100}{\text{Máximo} - \text{Mínimo ambiente } ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}}$$

A variabilidade do isótopo de cada otólito foi padronizada como uma porcentagem da variabilidade do isótopo/ambiental para cada peixe em uma determinada área de estudo. Para definir o comportamento dos peixes residentes, foi considerado os peixes que não saíram do seu habitat de origem ao longo da sua vida e ativos os peixes que excediam essa marca. Posteriormente, foi aplicada uma regressão logística para modelar a probabilidade de peixes realizarem movimentos em função da porcentagem da variabilidade otolítica/ambiental dos isótopos de estrôncio (POEVsri). Todos os testes estatísticos foram realizados utilizando o software R (<http://www.r-project.org/>), considerando o valor de $p < 0,05$ como limite para rejeitar a hipótese nula.

RESULTADOS

Foi coletado um total de 79 espécimens de *Cichla temensis*, sendo 21 capturados no rio Cuiuní, 16 no rio Aracá, 12 na área de confluência e 10 indivíduos capturados em cada um dos rios: Negro, Caurés e Demeni. Do total, 60 são indivíduos fêmeas, 10 machos e 9 foram identificados como imaturos. O comprimento padrão dos indivíduos variaram de 20,40 a 53,00 cm e o peso de 55,00 a 2.685,00 g (Tabela 1).

Tabela 1. Análise descritiva dos parâmetros biométricos do *Cichla temensis*. Onde, Min = Mínimo; Máx = Máximo; DP = Desvio padrão.

Local	N	Comprimento padrão (cm)		Peso (g)	
		Média ± DP	Mín-Max	Média ± DP	Mín-Max
Aracá	16	32,23 ± 8,70	20,40 - 53,00	692,19 ± 637,22	55,00 - 2475,00
Caurés	10	37,68 ± 2,59	32,00 - 41,00	1025,50 ± 219,80	635,00 - 1495,00
Confluência	12	36,18 ± 6,12	23,80 - 41,80	961,25 ± 394,50	255,00 - 1400,00
Cuiuni	21	36,73 ± 5,60	28,00 - 48,60	972,05 ± 564,60	365,00 - 2685,00
Demeni	10	35,30 ± 7,19	26,40 - 47,40	924,00 ± 520,81	345,00 - 1920,00
Negro	10	36,45 ± 6,89	25,00 - 46,50	986,00 ± 504,86	265,00 - 1780,00

Razões de isótopos de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) na água

O teste de Kruskal-Wallis revelou diferenças significativas nas razões isotópicas da água para $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre os locais avaliados ($\chi^2 = 25,99$, $df = 5$, $p < 0,001$). Especificamente, os rios Cuiuni e Caurés apresentaram os valores mais baixos ($< 0,7300$), enquanto o rio Aracá exibiu os valores mais radiogênicos ($0,76718 \pm 0,00578$), diferindo significativamente das demais sub-bacias ($p < 0,05$). As amostras da região da Confluência ($0,73541 \pm 0,00152$) e

as amostras dos rios Demeni ($0,73569 \pm 0,00495$) e Negro ($0,74287 \pm 0,00596$) não mostraram diferenças significativas entre si ($p > 0,05$), exibindo valores intermediários (Figura 2).

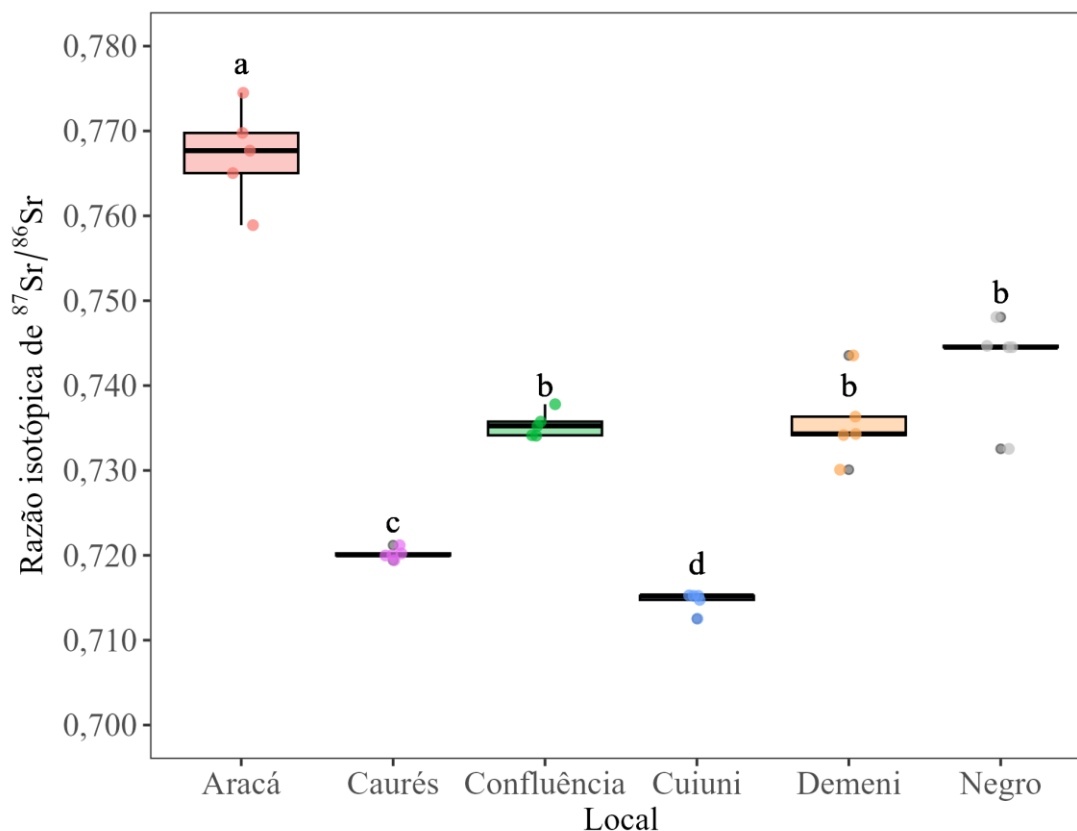


Figura 2. Comparação das razões isotópicas da água entre localidades do médio Rio Negro. Diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre as localidades são indicadas por letras distintas (teste post-hoc de Dunn).

A análise de cluster revelou três agrupamentos distintos, separando os afluentes da margem direita e esquerda do rio Negro. O cluster 1, composto pelas amostras do rio Aracá, que se destacam por suas assinaturas isotópicas diferenciadas em relação aos demais locais. Cluster 2, inclui as amostras dos rios Caurés e Cuiuni, que apresentam padrões isotópicos similares, sugerindo uma origem comum ou processos geológicos semelhantes. Cluster 3, formado pelas amostras dos rios Negro, Demeni e Confluência, indicando influências hidrogeológicas compartilhadas (Figura 3). O coeficiente de correlação cofenética apresentou um valor de 0,86, indicando uma boa representação das relações entre as amostras.

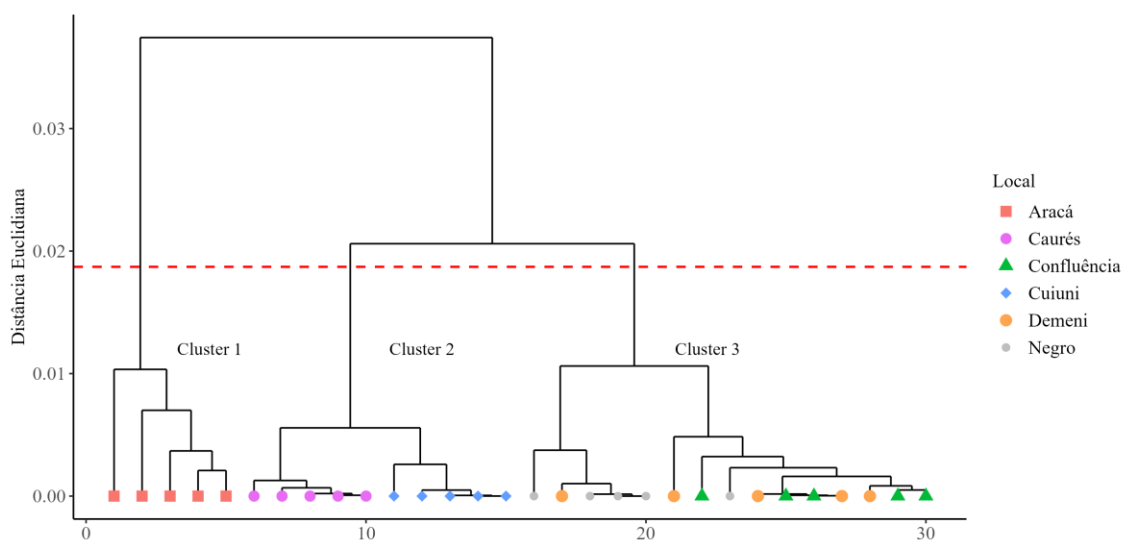


Figura 3. O dendrograma da análise de cluster mostrando a similaridade da razão isotópica de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) entre os locais amostrados.

Valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na borda do otólito (área de captura)

Os valores individuais de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ da borda do otólito para os locais de amostragem variou de 0,7067 a 0,7769 (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios ($\pm\text{DP}$) de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na borda do otólito para locais de amostragem de *Ciclha temensis*. Mín. = Mínimo, Máx. = Máximo, DP = Desvio padrão.

Local de coleta	Média $\pm$ DP	Mín.	Máx.
Aracá	0,7714 $\pm$ 0,0050	0,7580	0,7769
Caurés	0,7175 $\pm$ 0,0010	0,7162	0,7197
Confluência	0,7434 $\pm$ 0,0082	0,7342	0,7569
Cuiuni	0,7141 $\pm$ 0,0020	0,7067	0,7172
Demeni	0,7355 $\pm$ 0,0020	0,7326	0,7384
Negro	0,7329 $\pm$ 0,0065	0,7163	0,7378

A análise de regressão exibiu uma relação linear significativa da razão isotópica entre o valor da água e a borda do otólito ($R^2 = 0,95$, $p < 0,001$) (Figura 4).

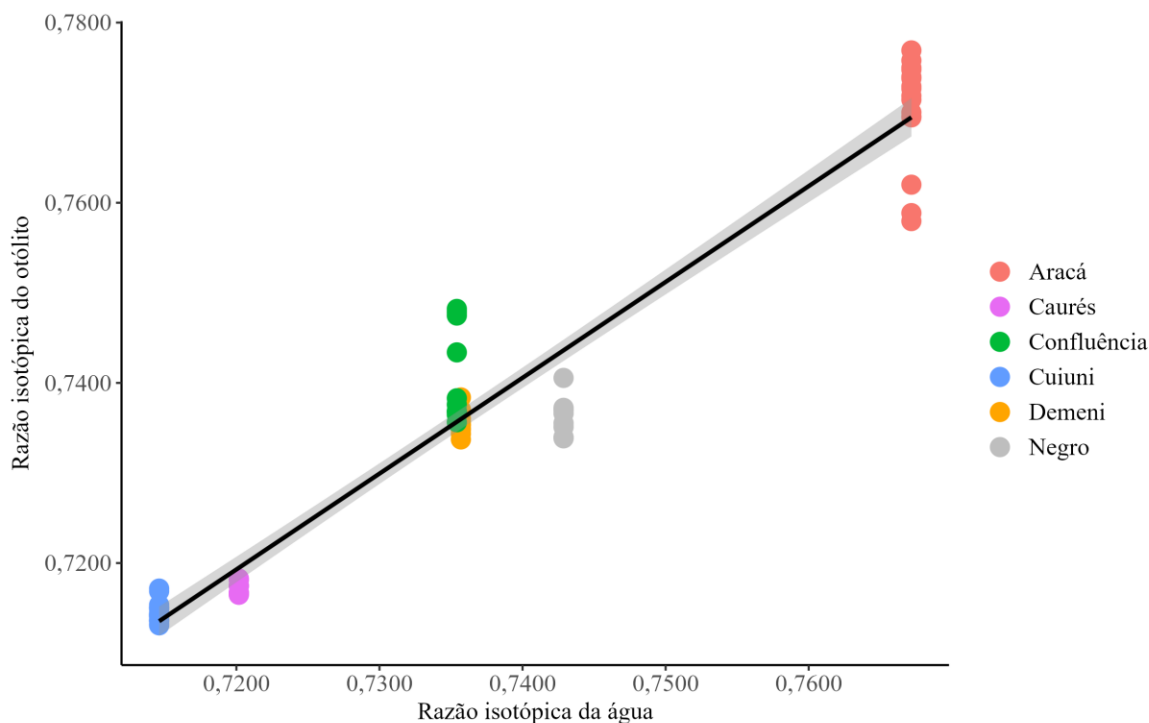


Figura 4. Relação entre a razão de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ medida na borda do otólito e água dos locais amostrados.

Padrão de movimento entre área de nascimento e captura

Devido a sobreposição da razão isotópica da água entre a região de confluência, Demeni e Negro, o padrão de movimento dos indivíduos desses locais foram observados separadamente. Ainda, dois peixes do Cuiuni e três peixes do rio Negro foram retirados das análises devido à alta quantidade de ruídos encontrada na leitura da razão isotópica, comprometendo a interpretação dos resultados.

A análise da razão isotópica de estrôncio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ao longo dos transectos nos otólitos de *Cichla temensis* indica que a maioria dos peixes apresenta um padrão de movimentação predominantemente restrito à região de origem, sem deslocamentos significativos para outras sub-bacias. Esse comportamento de alta fidelidade ao habitat é especialmente evidente nos rios Cuiuni, Caurés e Negro, cujos indivíduos exibem assinaturas isotópicas consistentes ao longo de suas vidas (Figura 5a, b e f). Em contraste, alguns peixes do rio Aracá demonstram maior variabilidade nos padrões de deslocamento, como observado nos indivíduos A58 e A76, que realizaram movimentos de longa distância e retornaram posteriormente à área de captura (Figura 5c).

Nos exemplares do rio Demeni, o padrão de movimentação também se mostra predominantemente restrito, com a maioria dos indivíduos permanecendo em áreas próximas à assinatura isotópica característica da região de origem. No entanto, a presença de dois indivíduos (D78 e D80) apresentaram assinaturas isotópicas na região do núcleo compatíveis com o rio Aracá, sugerindo eventos ocasionais de dispersão entre essas localidades (Figura 5d).

Na região de Confluência, os padrões de movimento foram mais complexos, com uma alta variabilidade entre os indivíduos. Essa heterogeneidade nos padrões de movimento pode estar relacionada a fatores ambientais locais, como disponibilidade de recursos, características do habitat e condições hidrológicas. Além disso, foi observado que dois indivíduos (Con16 e Con17) apresentaram assinaturas isotópicas mais elevadas no início de suas vidas, correspondentes ao rio Aracá, antes de se dispersarem para regiões menos radiogênicas (Figura 5e).

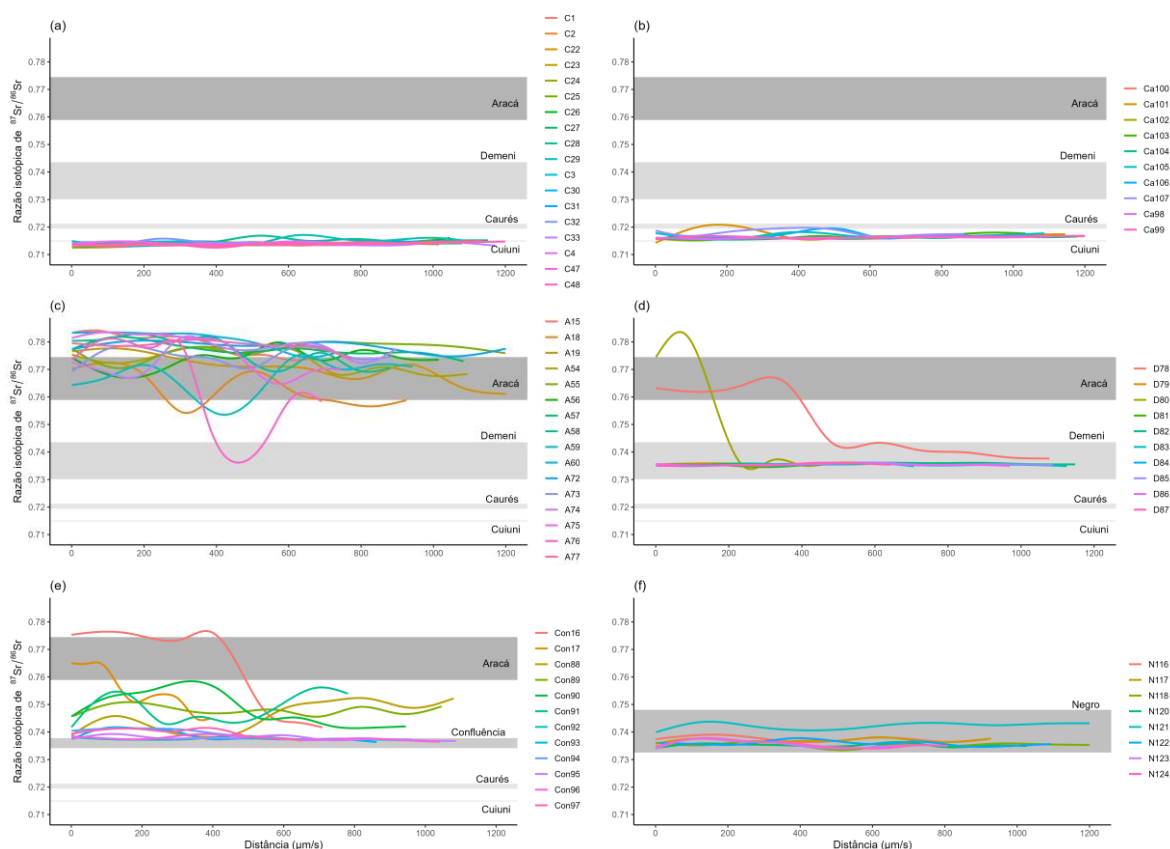


Figura 5. Padrões de movimentos de *Cichla temensis* $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obtidos por LA-MC-ICP-MS. As áreas sombreadas correspondem ao intervalo nas proporções de água $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dos locais amostrados. (a) Cuiuni; (b) Caurés; (c) Aracá; (d) Demeni; (e) Confluência; (f) Negro.

A regressão logística revelou que 80% ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,80$; $p < 0,005$) da probabilidade de movimento é explicada pelo POEVSr, com a curva sigmoide destacando um limiar crítico de ~36% de variabilidade otolítica/ambiental aumentam exponencialmente a chance de classificação como ativo (Figura 6).

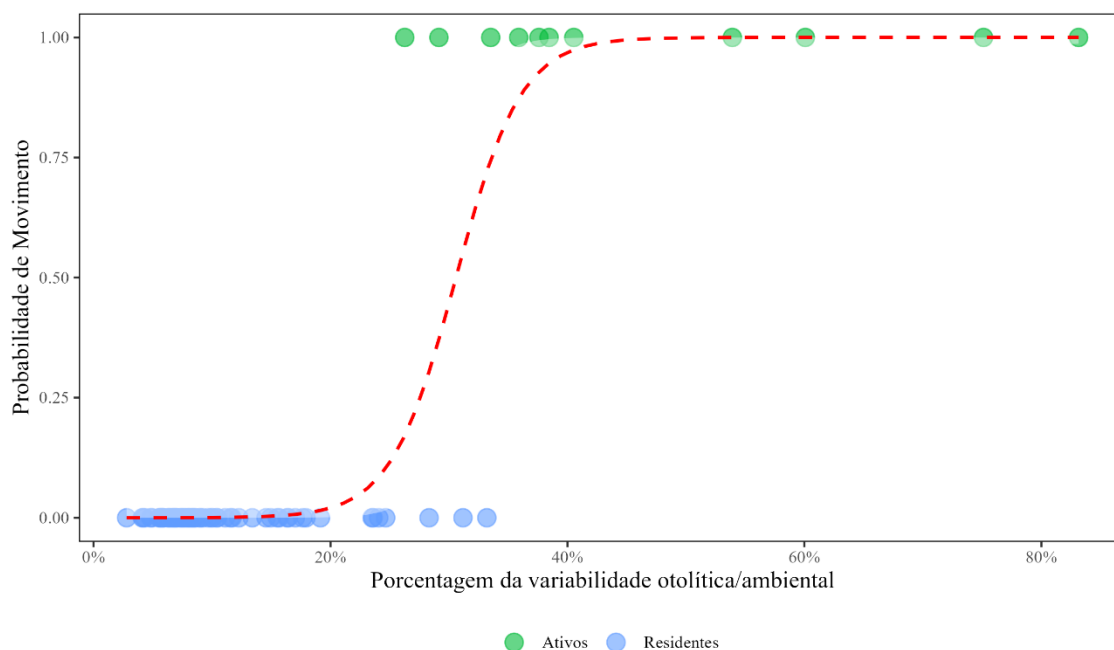


Figura 6. Modelo logístico para probabilidade de movimento em função porcentagem da variabilidade otolítica/ambiental dos isótopos de estrôncio (POEVSr). A linha vermelha em forma de S mostra as probabilidades de classificar um indivíduo como ativo e residente.

De acordo com os critérios estabelecidos, a maioria dos espécimes analisados apresentou comportamento residentes (64), enquanto 10 indivíduos mostraram um comportamento ativo (Figura 7). Os indivíduos classificados como residentes apresentaram variações de 2,79% a 33,19% da variação otolítica/ambiental de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Para os indivíduos classificados como ativos, a porcentagem da relação de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ otólito/ambiental apresentou uma variação de 26,26% a 83,15%. Entre os peixes que realizaram as movimentações ativas oito eram fêmeas (A19, A59, D78, D80, Con16, Con17, Con88, Con90 e Con91), 1 imaturo (A75) e 1 macho (A76).

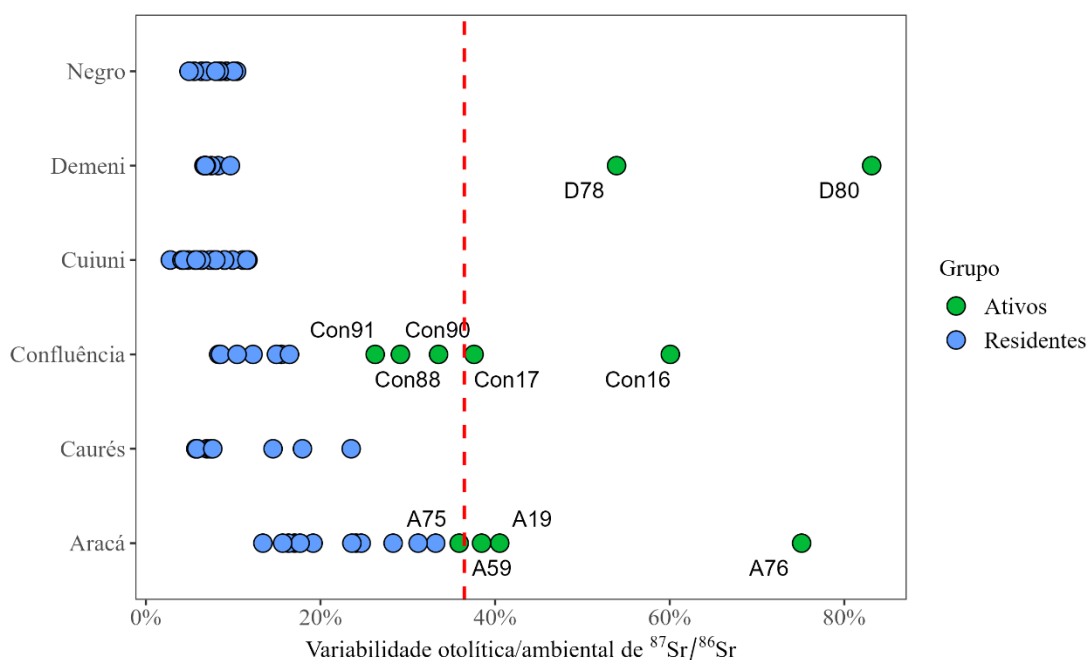


Figura 7. Porcentagem da faixa da variabilidade otolítica/ambiental de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para peixes ativos e residentes. A linha tracejada vertical demarca a probabilidade de movimento do modelo logístico.

DISCUSSÃO

A heterogeneidade da composição isotópica encontrada nos afluentes, reflete a geologia da bacia (Mereles et al., 2025), tornando este um excelente cenário para aplicar a cronologia geoquímica do otólito para estudar o movimento dos peixes (Garcez et al., 2014). Os rios da margem direita (Cuiuni e Caurés) apresentaram valores isotópicos mais baixos, consistentes com formações mais recentes da bacia sedimentar, definidas por menor concentração de Sr radiogênico. Por outro lado, os rios da margem esquerda (ex. Caurés) exibiram valores mais altos, associados ao intemperismo de rochas pré-cambrianas radiogênicas mais antigas do Escudo das Guianas (Santos et al., 2015). Já os valores intermediários dos isótopos de Sr presentes na região de Confluência e no Rio Negro refletem uma mistura das contribuições das duas margens, destacando a influência do contexto geológico regional na química das águas, evidenciando o papel das características geológicas das sub-bacias e dos processos de intemperismo na diferenciação isotópica do sistema fluvial (Mereles et al., 2025; Santos et al., 2015).

Embora as diferenças espaciais nas assinaturas isotópicas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) da água possam ser explicadas principalmente pela geologia da região, outros fatores como variações sazonais, processos biogeoquímicos locais e impactos antropogênicos, também podem influenciar significativamente (Hegg et al., 2013; Mereles et al., 2025; Zieliński et al., 2021). As variações temporais desses elementos ainda são pouco compreendidas e carecem de modelos preditivos robustos e confiáveis (Brennan et al., 2015). O uso da microquímica de otólitos para reconstruir a história de vida dos peixes tem se mostrado uma ferramenta poderosa, mas requer a criação de bibliotecas de "impressões digitais" químicas abrangendo múltiplas estações ou anos, a fim de capturar a variabilidade espacial e temporal dos elementos traço na água (Gillanders, 2002). No presente estudo, a influência da variabilidade temporal foi minimizada, uma vez que a assinatura isotópica dos otólitos e da água foi comparada dentro do mesmo período de coleta, correspondente ao período de águas baixas. Esse controle temporal garantiu maior precisão na interpretação dos dados, reduzindo possíveis discrepâncias causadas por mudanças sazonais na química da água. No entanto, estudos adicionais são necessários para quantificar melhor possíveis efeitos de defasagem temporal na incorporação dos elementos nos otólitos e validar a confiabilidade desse método em diferentes contextos ecológicos e geológicos (Gillanders, 2002).

A relação linear das razões isotópica ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) medidas na água e nos otólitos dos peixes, calculadas por local de coleta, foi altamente significativa. Resultados semelhantes foram obtidos por Avigliano et al., (2023b) e Pouilly et al., (2014) avaliando diferentes espécies de peixes em distintas bacias hidrográficas. Esses achados reforçam a ausência de fracionamento isotópico biológico de Sr em estruturas calcificadas, como os otólitos, onde registram o mesmo sinal de água $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Campana, 1992; Campana, Thorrold, 2001). No entanto, a alta variabilidade observada ao longo dos transectos dos peixes na região de confluência, reflete a mistura de rios com diferentes composições químicas (Avigliano et al., 2023a). Em áreas de confluências de rios, as massas d'água requerem dezenas de quilômetros para se misturarem por completo (Lane et al., 2008). Essa variação em pequena escala pode impactar significativamente a interpretação no movimento dos peixes (Avigliano et al., 2023b), uma vez que, os movimentos de curta escala podem resultar em variação da mesma ordem de magnitude que as migrações de longa distância. Além disso, a borda do otólito pode não ser capaz de registrar o sinal isotópico da área de captura se os peixes se moverem entre as duas massas de água em períodos relativamente curtos (Avigliano et al., 2023a). Isso

ocorre porque os otólitos podem registrar sinais isotópicos de até 20 dias antes da captura (Woods et al., 2010). Assim, movimentos entre duas regiões com frequência, podem causar ruído nas leituras, evidenciando a importância de investigar a distribuição desse geomarcador em áreas de confluência para aprimorar a precisão preditiva dos modelos baseados na relação otólito/água (Avigliano et al., 2023b).

A partir da discriminação dos afluentes baseada na composição isotópica de estrôncio da água e da leitura da razão isotópica dos otólitos, foi possível avaliar os movimentos dos espécimens de *Cichla temensis* nos tributários da região do médio Rio Negro. Os resultados de ablações de transectos de otólitos sugerem que a maioria dos indivíduos permanecem restrito ao seu habitat de origem até o momento da captura, com pequenas movimentações dentro das sub-bacias de origem. Esse padrão é evidenciado principalmente no rio Cuiuni e Caurés, localizado na margem direita do rio Negro. As variações observadas ao longo dos transectos dos otólitos para alguns indivíduos, podem representar movimento entre o canal principal e os lagos adjacentes ou variações sazonais. Portanto, não é possível afirmar que os indivíduos saíram do rio de origem.

A restrição espacial de *C. temensis* a determinados ambientes pode ser explicada por uma combinação de fatores, desde aspectos da história de vida da espécie à heterogeneidade ambiental. Essa espécie apresenta forte seletividade por áreas com estruturas submersas, como galhadas e raízes, que fornecem abrigo contra predadores e condições ideais para emboscadas predatórias, características essenciais para seu forrageamento (Winemiller, 2001). Além disso, a estabilidade química da água também pode influenciar a fidelidade ao habitat, pois alterações na composição iônica entre diferentes sistemas podem representar barreiras fisiológicas ao deslocamento (Olden et al., 2006).

A presença de peixes originários de diferentes rios, como observado nos indivíduos que deslocam do rio Aracá para o Demeni e a região de Confluência, evidencia existência de corredores ecológicos e a importância da conectividade entre os habitats para a manutenção das populações locais (Rinaldo et al., 2018; Seliger, Zeiringer, 2018). Esses padrões de movimento e dispersão, podem ser influenciados por fatores físicos (ex. hidrologia) e bióticos (ex. disponibilidade de recursos), que determinam a estrutura populacional de uma espécie (Crook et al., 2015). Em ecossistemas aquáticos, muitas espécies formam subpopulações geograficamente isoladas, mas conectadas pela dispersão de indivíduos (Shima et al., 2010). Essa dinâmica permite que áreas-fonte, que exportam indivíduos que sustentem

áreas-destino, que dependem desse fluxo para evitar declínios populacionais (Gotelli, 1991; Shima et al., 2010) . Além disso, a dispersão entre subpopulações promove a troca genética, aumentando a diversidade genética e a resiliência das populações a mudanças ambientais. Dessa forma, a conectividade não só assegura a estabilidade demográfica, mas também fortalece a capacidade adaptativa das espécies, sendo essencial para estratégias de conservação (Allendorf et al., 2012).

Os resultados mostraram que os eventuais movimentos entre diferentes sub-bacias ocorrem principalmente em indivíduos fêmeas. Esse comportamento pode estar relacionado à busca de habitats mais adequados para reprodução, estratégia comum em espécies que exibem cuidado parental, como o *C. temensis* (Winemiller, 2001). A movimentação fêmea também pode ser influenciada por pressões ecológicas, como a necessidade de evitar competição intraespecífica ou explorar áreas com maior disponibilidade de recursos (Hoeinghaus et al., 2003). Além disso, as fêmeas podem priorizar ambientes com características químicas e físicas que maximizem o sucesso reprodutivo e a sobrevivência da prole, enquanto os machos, responsáveis pela proteção do território, tendem a permanecer mais restritos ao local de origem (Lowe-McConnell, 1999).

Os padrões observados na movimentação de *C. temensis* são consistentes com estudos anteriores realizados na mesma região do estudo. Sousa et al. (2016) destacaram a tendência filopátricas predominante da espécie, com a maioria dos indivíduos permanecendo em seus locais de nascimento, ainda que tenham observado deslocamentos pontuais de alguns indivíduos. Garcez et al. (2014), ao examinarem juvenis da espécie, reforçaram essa tendência de permanência local, indicando que o comportamento de dispersão é limitado desde as fases iniciais do ciclo de vida, sugerindo que fatores ambientais e a fidelidade ao habitat desempenham papéis fundamentais na história de vida de *C. temensis*. Por outro lado, o trabalho de Hoeinghaus et al. (2003) identificou maior mobilidade em populações de *C. temensis* em sistemas de várzea, onde os pulsos de inundação sazonal promovem maior conectividade entre habitats, contrastando com a menor dispersão observada em ambientes de água preta, como no rio Negro. Barraco (2019) constatou a influência de barragens na movimentação do *C. temensis*, onde os peixes da região de montante permaneceram mais restritos, enquanto os indivíduos da área de jusante exibiram maior diversidade de movimento. Essas descobertas, em conjunto, indicam que os padrões de movimentação da espécie são altamente contextuais, influenciados tanto por características ambientais, como

a heterogeneidade isotópica e a conectividade hidrológica, quanto por fatores intrínsecos, como estratégias reprodutivas e fidelidade ao habitat.

Os resultados demonstram que a variabilidade isotópica de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nos otólitos, quantificada pelo POEVSr, é um indicador robusto para inferir movimentos em peixes, corroborando a eficácia do modelo proposto por Rosa et al. (2023). A predominância de indivíduos residentes sugere que a população estudada no rio Negro depende fortemente de habitats estáveis, um padrão comum em ecossistemas de águas pretas, onde a previsibilidade ambiental favorece a residência (Winemiller et al., 1997). A heterogeneidade ambiental, aliada às contribuições de tributários laterais com diferentes qualidades de água para cada unidade geomorfológica, emerge como fator determinante na movimentação dos peixes (Mayora et al., 2020; Stoffers et al., 2022). Além disso, variáveis como temperatura, condições de fluxo, heterogeneidade do habitat, tamanho do canal e localização na bacia hidrográfica também exercem forte influência sobre os padrões de deslocamento (Comte, Olden, 2018; Stoffers et al., 2022).

Poucos estudos foram realizados sobre a movimentação de espécies descritas como sedentárias na Bacia Amazônica (Castello, 2008; David J. Hoeinghaus et al., 2003; Holley et al., 2008; Pereira et al., 2022; Sousa et al., 2016). A compreensão dos padrões espaciais e temporais dos movimentos dos peixes é essencial para o manejo e conservação desses recursos (Hauser et al., 2018). A diversidade de origens entre os indivíduos evidencia a presença de corredores ecológicos que interligam habitats, contribuindo para a manutenção da diversidade genética e a resiliência das populações frente às pressões ambientais e antrópicas (McIntyre et al., 2016; Palkovacs et al., 2012). Contudo, o aumento das atividades pesqueiras e as mudanças climáticas impõem desafios adicionais à conservação das espécies de peixes, exigindo abordagens integradas que considerem tanto os fatores bióticos quanto os abióticos (Olden et al., 2006). No caso dos tucunarés, a tendência natural de permanecerem e/ou retornarem aos seus locais de origem ou a áreas específicas durante seus ciclos de vida, em vez de se dispersarem amplamente, pode intensificar os impactos da pesca e das alterações de habitat, dificultando a avaliação dos estoques. Assim, a proteção dos habitats de reprodução e alimentação, juntamente com a preservação dos corredores migratórios, é crucial para a conservação desses indivíduos, tornando indispensáveis estudos detalhados sobre sua dinâmica populacional e padrões de migração para o desenvolvimento de estratégias de manejo eficazes.

CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam que *Cichla temensis* no médio Rio Negro apresenta um comportamento predominantemente residente, com 86,49% dos indivíduos analisados permanecendo em suas sub-bacias de origem. Contudo, 13,51% dos exemplares exibiram dispersões ocasionais, especialmente em áreas de confluência e no rio Aracá, onde a heterogeneidade geológica e hidroquímica cria gradientes ambientais que facilitam movimentos entre esses habitats. Esses padrões destacam a influência decisiva da geologia local, com rios da margem direita (Cuiuni e Caurés) associados a assinaturas isotópicas menos radiogênicas e maior estabilidade populacional, enquanto a margem esquerda (Aracá) apresenta maior mobilidade, ligada a rochas pré-cambrianas e conectividade hidrológica. A identificação de corredores ecológicos, como entre os rios Demeni e Aracá, reforça a importância de habitats interligados para a resiliência genética e ecológica da espécie, principalmente frente a pressões como a sobrepesca e alterações climáticas. A metodologia baseada em otólitos mostrou-se robusta para mapear movimentos em escalas espaciais complexas, oferecendo um modelo aplicável a outras espécies amazônicas. Para conservação, se tornar necessário a proteção de tributários críticos, manter a conectividade entre sub-bacias e implementar monitoramento contínuo, considerando a vulnerabilidade de populações residentes à exploração localizada. Estudos futuros devem expandir a escala temporal, integrar dados genéticos e avaliar impactos ambientais, assegurando estratégias de manejo e a conservação deste recurso-chave para a pesca na Amazônia.

REFERÊNCIAS

Aguiar-Santos J, deHart PAP, Pouilly M, Freitas CEC, Siqueira-Souza FK. Trophic ecology of speckled peacock bass *Cichla temensis* Humboldt 1821 in the middle Negro River, Amazon, Brazil. Ecol Freshw Fish. 2018; 27(4):1076–86. doi: <https://doi.org/10.1111/eff.12416>.

Allendorf FW, Luikart GH, Aitken SN. Conservation and the genetics of populations. John Wiley & Sons; 2012.

Avigliano E, Chung M-T, Pouilly M, Huang K-F, Casalnuovo M, Dominino J, et al. Strontium isotope mapping and its application to study the fish life history (*Salminus*

brasiliensis) in semi-fragmented rivers (La Plata Basin, South America). *Fish Res.* 2023a; 265:106741. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2023.106741>.

Avigliano E, Pouilly M, Bouchez J, Domanico A, Sánchez S, Llamazares Vegh S, et al. Strontium isotopes (^{87}Sr ^{86}Sr) reveal the life history of freshwater migratory fishes in the La Plata Basin. *River Res Appl.* 2020; 36(10):1985–2000. doi: <https://doi.org/10.1002/rra.3727>.

Avigliano E, Pouilly M, Vargas F, Penha J, Silva N, Bouchez J, et al. Environmental history of one of the largest freshwater neotropical fish (*Zungaro jahu*) from otolith isotopic analysis. *River Res Appl.* 2023b; 39(5):887–96. doi: <https://doi.org/10.1002/rra.4120>.

Barroco, L. S. A. (2019). O efeito de barragens hidrelétricas sobre populações de peixes de rios de águas pretas na Amazônia: uma abordagem com o uso de marcadores biogeoquímicos e moleculares.

Batista J da S, Alves-Gomes JA. Phylogeography of *Brachyplatystoma rousseauxii* (Siluriformes-Pimelodidae) in the Amazon Basin offers preliminary evidence for the first case of "homing" for an Amazonian migratory catfish. Volume 5, Número 4, Pags 723-740. 2006.

Brennan SR, Fernandez DP, Zimmerman CE, Cerling TE, Brown RJ, Wooller MJ. Strontium isotopes in otoliths of a non-migratory fish (*slimy sculpin*): Implications for provenance studies. *Geochim Cosmochim Acta.* 2015; 149:32–45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.10.032>.

Campana SE. Measurement and interpretation of the microstructure of fish otoliths. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences. 1992; 117(1):59–71.

Campana SE, Thorrold SR. Otoliths, increments, and elements: keys to a comprehensive understanding of fish populations? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.* 2001; 58(1):30–8. doi: <https://doi.org/10.1139/f00-177>.

Castello L. Lateral migration of *Arapaima gigas* in floodplains of the Amazon. *Ecol Freshw Fish.* 2008; 17(1):38–46. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0633.2007.00255.x>.

Closs G, Krkosek M, Olden JD. Conservation of freshwater fishes. Cambridge University Press; 2016.

Comte L, Olden JD. Evidence for dispersal syndromes in freshwater fishes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences.* 2018; 285(1871):20172214. doi: <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2214>.

Crook DA, Lowe WH, Allendorf FW, Eros T, Finn DS, Gillanders BM, et al. Human effects on ecological connectivity in aquatic ecosystems: Integrating scientific approaches to support management and mitigation. *Science of The Total Environment*. 2015; 534:52–64. doi: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.04.034>.

Duponchelle F, Isaac VJ, Rodrigues Da Costa Doria C, Van Damme PA, Herrera-R GA, Anderson EP, et al. Conservation of migratory fishes in the Amazon basin. *Aquat Conserv*. 2021; 31(5):1087–105. doi: <https://doi.org/10.1002/aqc.3550>.

Duponchelle F, Pouilly M, Pécheyran C, Hauser M, Renno J, Panfili J, et al. Trans-Amazonian natal homing in giant catfish. *Journal of Applied Ecology*. 2016; 53(5):1511–20.

Freitas CEC, Rivas AAF. A pesca e os recursos pesqueiros na Amazônia Ocidental. *Cienc Cult*. 2006; 58(3):30–2.

Garcez RCS, Humston R, Harbor D, Freitas CEC. Otolith geochemistry in young-of-the-year peacock bass *Cichla temensis* for investigating natal dispersal in the Negro River (Amazon - Brazil) river system. *Ecol Freshw Fish*. 2014; 24(2):242–51. doi: <https://doi.org/10.1111/eff.12142>.

Gillanders BM. Temporal and spatial variability in elemental composition of otoliths: implications for determining stock identity and connectivity of populations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2002; 59(4):669–79. doi: <https://doi.org/10.1139/f02-040>.

Gotelli NJ. Metapopulation models: the rescue effect, the propagule rain, and the core-satellite hypothesis. *Am Nat*. 1991; 138(3):768–76.

Hauser M, Doria CRC, Santos R V, García-Vasquez A, Pouilly M, Pécheyran C, et al. Shedding light on the migratory patterns of the Amazonian goliath catfish, *Brachyplatystoma platynemum*, using otolith $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ analyses. *Aquat Conserv*. 2019; 29(3):397–408.

Hegg Jens C, Giarrizzo T, Kennedy BP. Diverse early life-history strategies in migratory Amazonian catfish: implications for conservation and management. *PLoS One*. 2015; 10(7):1–19.

Hegg Jens C., Giarrizzo T, Kennedy BP. Diverse Early Life-History Strategies in Migratory Amazonian Catfish: Implications for Conservation and Management. *PLoS One*. 2015; 10(7):e0129697. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129697>.

Hegg JC, Kennedy BP, Fremier AK. Predicting strontium isotope variation and fish location with bedrock geology: Understanding the effects of geologic heterogeneity. *Chem Geol.* 2013; 360–361:89–98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.010>.

Hermann TW, Duponchelle F, Castello L, Limburg KE, Pereira LA, Hauser M. Harnessing the potential for otolith microchemistry to foster the conservation of Amazonian fishes. *Aquat Conserv.* 2021; 31(5):1206–20. doi: <https://doi.org/10.1002/aqc.3567>.

Hermann TW, Stewart DJ, Limburg KE, Castello L. Unravelling the life history of Amazonian fishes through otolith microchemistry. *R Soc Open Sci.* 2016; 3(6):160206.

Herrera-R GA, Heilpern SA, Couto TBA, Victoria-Lacy L, Duponchelle F, Correa SB, et al. A synthesis of the diversity of freshwater fish migrations in the Amazon basin. *Fish and Fisheries.* 2024; 25(1):114–33. doi: <https://doi.org/10.1111/faf.12795>.

Hoeinghaus David J., Layman CA, Arrington DA, Winemiller KO. Movement of *Cichla* species (Cichlidae) in a Venezuelan floodplain river. *Neotropical Ichthyology.* 2003; 1(2):121–6. doi: <https://doi.org/10.1590/S1679-62252003000200006>.

Holley MH, Maceina MJ, Thomé-Souza M, Forsberg BR, Thomé-Souza M, Forsberg BR. Analysis of the trophy sport fishery for the speckled peacock bass in the Rio Negro River, Brazil. *Fish Manag Ecol.* 2008; 15(2):93–8. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2007.00587.x>.

Inomata SO, Freitas CEC. Fish landings in Barcelos, in the middle Negro River region, Amazonas. *WIT Trans Ecol Environ.* 2015; 192:67–76.

Jepsen DB, Winemiller KO, Taphorn DC. Temporal patterns of resource partitioning among *Cichla* species in a Venezuelan blackwater river. *J Fish Biology.* 1997; 51(6):1085–108.

Kennedy BP, Blum JD, Folt CL, Nislow KH. Using natural strontium isotopic signatures as fish markers: methodology and application. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.* 2000; 57(11):2280–92. doi: <https://doi.org/10.1139/f00-206>.

Lane SN, Parsons DR, Best JL, Orfeo O, Kostaschuk RA, Hardy RJ. Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Río Paraná and Río Paraguay, Argentina. *J Geophys Res Earth Surf.* 2008; 113(F2). doi: <https://doi.org/10.1029/2006JF000745>.

Latrubesse EM, Franzinelli E. The late Quaternary evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: implications for island and floodplain formation in large anabranching tropical systems. *Geomorphology.* 2005; 70(3–4):372–97.

Liermann CR, Nilsson C, Robertson J, Ng RY. Implications of Dam Obstruction for Global Freshwater Fish Diversity. *Bioscience*. 2012; 62(6):539–48. doi: <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.6.5>.

Lopes GC dos S, Freitas CE de C. Dynamics of Commercial Fishery at the Middle Stretch of the Negro River: Exploitation Intensity by Fishing Grounds. *Boletim Do Instituto de Pesca*. 2019; 45(4). doi: <https://doi.org/10.20950/1678-2305.2019.45.4.491>.

Lubich C, Campos C, Freitas C, Siqueira-Souza F. Effects of Fishing on the Population of Speckled Pavon *Cichla temensis* in the Middle Negro River (Amazonas State, Brazil): A Decrease in the Size of the Trophy Fish? *Trans Am Fish Soc*. 2021; 150(6):667–78. doi: <https://doi.org/10.1002/tafs.10329>.

Lubich C, Siqueira-Souza F, Freitas C. Freshwater sport fishing: characterization of operations in the middle Negro River, Amazonas, Brazil. *Boletim Do Instituto de Pesca*. 2023; 49. doi: <https://doi.org/10.20950/1678-2305/bip.2023.49.e738>.

Lucas M, Baras E. Migration of freshwater fishes. John Wiley & Sons; 2008.

Mayora G, Scarabotti P, Schneider B, Alvarenga P, Marchese M. Multiscale environmental heterogeneity in a large river-floodplain system. *J South Am Earth Sci*. 2020; 100:102546. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102546>.

Mereles M de A, Sousa RGC, Pouilly M, Pereira DV, Mc Comb GL, Filizola N, et al. Distribution of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in surface waters of the Amazon basin: A basis for studies on provenance. *Science of The Total Environment*. 2025; 965:178630. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178630>.

Olden JD, Poff NLR, Douglas MR, Douglas ME, Fausch KD. Ecological and evolutionary consequences of biotic homogenization. *Trends Ecol Evol*. 2004; 19(1):18–24. doi: <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2003.09.010>.

Pereira L, Barbosa JM, Sousa RGC. The Amazonian *Arapaima* changes its status from threatened species to an invader of earth's freshwater ecosystems. *Acta of Fisheries and Aquatic Ressources*. 2022; 10(2):97–107. doi: <https://doi.org/10.46732/actafish.2022.10.2.97-107>.

Pereira LA, Santos R V., Hauser M, Duponchelle F, Carvajal4 F, Pecheyran C, et al. Commercial traceability of *Arapaima* spp. fisheries in the Amazon basin: can biogeochemical tags be useful? 2019.

Pouilly M, Point D, Sondag F, Henry M, Santos R V. Geographical Origin of Amazonian Freshwater Fishes Fingerprinted by $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Ratios on Fish Otoliths and Scales. *Environ Sci Technol*. 2014; 48(16):8980–7. doi: <https://doi.org/10.1021/es500071w>.

Rosa, FR, Avigliano, E., Duponchelle, F., Pereira, LA, Hauser, M., Barroco, LSA, & Sousa, RGC (2023). Metanálise das proporções $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em otólitos para estabelecer limites para determinar o movimento dos peixes. *Boletim do Instituto de Pesca*, 49.

Ribeiro MCL de B, Petrere MJ. Fisheries ecology and management of the Jaraqui (*Semaprochilodus Taeniurus*, *S. Insignis*) in central Amazonia. *Regulated Rivers: Research & Management*. 1990; 5(3):195–215. doi: <https://doi.org/10.1002/rrr.3450050302>.

Ribolli J, Zaniboni-Filho E, Machado CB, Guerreiro TC de S, Freitas PD, Galetti Jr PM. Anthropogenic river fragmentation reduces long-term viability of the migratory fish *Salminus brasiliensis* (Characiformes: Bryconidae) populations. *Neotropical Ichthyology*. 2021; 19(2). doi: <https://doi.org/10.1590/1982-0224-2020-0123>.

Rinaldo A, Gatto M, Rodriguez-Iturbe I. River networks as ecological corridors: A coherent ecohydrological perspective. *Adv Water Resour*. 2018; 112:27–58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.005>.

Röpke C, Cella-Ribeiro A, Ferreira FC, de Araújo TR, da Costa Dória CR, Gusmão F, et al. The seasonal rate of discharge change as the primary trigger synchronizing freshwater fish reproduction in an Amazonian River. *Rev Fish Biol Fish*. 2024; 34(4):1619–35. doi: <https://doi.org/10.1007/s11160-024-09891-x>.

Rosa FR da, Avigliano E, Duponchelle F, Pereira LA, Hauser M, Barroco LSA, et al. Meta-analysis of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in otoliths to establish thresholds for determining fish movement. *Boletim Do Instituto de Pesca*. 2023; 49. doi: <https://doi.org/10.20950/1678-2305/bip.2023.49.e832>.

Santos R V., Sondag F, Cochonneau G, Lagane C, Brunet P, Hattingh K, et al. Source area and seasonal $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variations in rivers of the Amazon basin. *Hydrol Process*. 2015; 29(2):187–97. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.10131>.

Seliger C, Zeiringer B. River Connectivity, Habitat Fragmentation and Related Restoration Measures. *Riverine Ecosystem Management*. Cham: Springer International Publishing; 2018. p.171–86. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_9.

Shima JS, Noonburg EG, Phillips NE. Life history and matrix heterogeneity interact to shape metapopulation connectivity in spatially structured environments. *Ecology*. 2010; 91(4):1215–24. doi: <https://doi.org/10.1890/08-2058.1>.

Smith KT, Whitley GW. Fin ray chemistry as a potential natural tag for smallmouth bass in northern Illinois rivers. *J Freshw Ecol*. 2010; 25(4):627–35.

Sousa RGC, Humston R, Freitas CEC. Movement patterns of adult peacock bass *Cichla temensis* between tributaries of the middle Negro River basin (Amazonas - Brazil): an otolith geochemical analysis. *Fish Manag Ecol*. 2016; 23(1):76–87. doi: <https://doi.org/10.1111/fme.12166>.

Stoffers T, Buijse AD, Geerling GW, Jans LH, Schoor MM, Poos JJ, et al. Freshwater fish biodiversity restoration in floodplain rivers requires connectivity and habitat heterogeneity at multiple spatial scales. *Science of The Total Environment*. 2022; 838:156509. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156509>.

Thomé-Souza MJF, Maceina MJ, Forsberg BR, Marshall BG, Carvalho ÁL. Peacock bass mortality associated with catch-and-release sport fishing in the Negro River, Amazonas State, Brazil. *Acta Amazon*. 2014; 44(4):527–32.

Vazzoler A. *Biologia da reprodução de peixes teleósteos: teoria e prática*. vol. 169. 1996.

Walther BD, Thorrold SR. Water, not food, contributes the majority of strontium and barium deposited in the otoliths of a marine fish. *Mar Ecol Prog Ser*. 2006; 311:125–30.

Willis SC, Nunes M, Montana CG, Farias IP, Orti G, Lovejoy NR. The Casiquiare river acts as a corridor between the Amazonas and Orinoco river basins: biogeographic analysis of the genus *Cichla*. *Mol Ecol*. 2010; 19(5):1014–30.

Willis SC, Winemiller KO, Montana CG, Macrander J, Reiss P, Farias IP, et al. Population genetics of the speckled peacock bass (*Cichla temensis*), South America's most important inland sport fishery. *Conservation Genetics*. 2015; 16(6):1345–57.

Winemiller KO. Ecology of peacock cichlids (*Cichla* spp.) in Venezuela. *Journal of Aquaculture and Aquatic Sciences*. 2001; 9:93–112.

Winemiller KO, López-Fernández H, Taphorn DC, Nico LG, Duque AB. Fish assemblages of the Casiquiare River, a corridor and zoogeographical filter for dispersal between the Orinoco and Amazon basins. *J Biogeogr*. 2008; 35(9):1551–63.

Winemiller KO, Taphorn DC, Barbarino-Duque A. Ecology of *Cichla* (Cichlidae) in two blackwater rivers of southern Venezuela. *Copeia*. 1997:690–6.

Woods RJ, Macdonald JJ, Crook DA, Schmidt DJ, Hughes JM. Contemporary and historical patterns of connectivity among populations of an inland river fish species inferred from genetics and otolith chemistry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2010; 67(7):1098–115. doi: <https://doi.org/10.1139/F10-043>.

Zar JH. *Biostatistical Analysis*. 5th ed. New Jersey: 2010.

Zieliński M, Dopieralska J, Królikowska-Ciągło S, Walczak A, Belka Z. Mapping of spatial variations in Sr isotope signatures ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in Poland — Implications of anthropogenic Sr contamination for archaeological provenance and migration research. *Science of The Total Environment*. 2021; 775:145792. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145792>.

SÍNTESE

No primeiro estudo, foi desenvolvido um isoscape de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para a Bacia Amazônica, com o objetivo de entender a influência da geologia na composição isotópica das águas superficiais. Os resultados mostraram uma alta heterogeneidade isotópica, com valores mais elevados associados a rochas antigas (Escudos das Guianas e Brasileiro) e valores mais baixos em áreas de formação recente (região andina). A correlação entre os valores isotópicos da água e dos otólitos de peixes validou o uso do isoscape para estudos de proveniência e migração. Esse mapeamento fornece uma base para pesquisas ecológicas, arqueológicas e de conservação, destacando a importância da geologia na dinâmica hidroquímica da região.

No segundo estudo, foram analisados os padrões de movimento do *Cichla temensis* em afluentes do médio Rio Negro, utilizando isótopos de estrôncio em otólitos. Os resultados indicaram que a maioria dos indivíduos permaneceu em suas sub-bacias de origem, demonstrando um comportamento predominantemente residente. No entanto, alguns indivíduos exibiram movimentos entre sub-bacias sugerindo a existência de corredores ecológicos. A alta correlação ($r^2=0,95$) entre as assinaturas isotópicas da água e dos otólitos confirmou a eficácia do método para rastrear movimentos de peixes. A geologia local e a conectividade hidrológica foram identificadas como fatores determinantes para a mobilidade dos peixes.

A variabilidade temporal, como mudanças sazonais na composição isotópica da água, não foi totalmente capturada, e estudos futuros devem expandir a coleta de dados para diferentes períodos hidrológicos. Além disso, a influência de atividades antrópicas, como mineração e desmatamento, pode alterar a geoquímica da água e, consequentemente, os padrões de movimento das espécies. A complexidade hidrológica da Bacia Amazônica, com suas confluências e variações sazonais, também dificulta a avaliação precisa dos impactos específicos da fragmentação e da conectividade entre habitats.

Este estudo contribui para o entendimento de como a geologia e a conectividade hidrológica influenciam a movimentação de peixes em sistemas fluviais complexos como a Amazônia. A aplicação de isótopos de estrôncio em otólitos mostrou-se uma ferramenta poderosa para rastrear padrões de residência e dispersão, fornecendo informações valiosas para a conservação de espécies-chave. Sugerimos que estudos futuros considerem: 1 -

Expansão Temporal: Investigar variações sazonais e plurianuais na composição isotópica da água e dos otólitos; 2 - Impactos Antrópicos: Avaliar como atividades humanas, como barragens e desmatamento, afetam a geoquímica da água e os padrões de movimento das espécies e; 3 - Integração de Dados Genéticos: Combinar análises isotópicas com dados genéticos para uma compreensão mais abrangente da estrutura populacional e da conectividade entre habitats.