



**ALEXANDRE PERESSIN**

**MIGRATION OF NEOTROPICAL FISHES IN A FREE  
FLOWING RIVER STRETCH: EVALUATION OF  
BIOTELEMETRY AS STUDY METHOD, INSIGHTS ABOUT  
PARTIAL MIGRATION, AND CONSEQUENCES FOR  
CONSERVATION**

**LAVRAS – MG  
2022**

**ALEXANDRE PERESSIN**

**MIGRATION OF NEOTROPICAL FISHES IN A FREE FLOWING RIVER STRETCH:  
EVALUATION OF BIOTELEMETRY AS STUDY METHOD, INSIGHTS ABOUT PARTIAL  
MIGRATION, AND CONSEQUENCES FOR CONSERVATION**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Ecologia Aplicada, área de  
concentração em Ecologia e Conservação de  
Recursos Naturais em Ecossistemas Fragmentados e  
Agrossistemas, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Paulo Dos Santos Pompeu  
Orientador

Prof. Dr. Luis David Solis Murgas  
Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2022**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Peressin, Alexandre.

Migration of neotropical fishes in a free flowing river stretch:  
Evaluation of biotelemetry as study method, insights about partial  
migration, and consequences for conservation / Alexandre Peressin.  
- 2022.

86 p. : il.

Orientador(a): Paulo dos Santos Pompeu.

Coorientador(a): Luis David Solis Murgas.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. intermittent reproduction. 2. migration triggers. 3.  
neotropical. I. Pompeu, Paulo dos Santos. II. Murgas, Luis David  
Solis. III. Título.

**ALEXANDRE PERESSIN**

**MIGRAÇÃO DE PEIXES NEOTROPICAIS EM UM TRECHO DE RIO LIVRE:  
AVALIAÇÃO DA BIOTELEMETRIA COMO TÉCNICA DE ESTUDO, INVESTIGAÇÕES  
PRELIMINARES SOBRE MIGRAÇÃO PARCIAL E CONSEQUÊNCIAS PARA  
CONSERVAÇÃO**

**MIGRATION OF NEOTROPICAL FISHES IN A FREE FLOWING RIVER STRETCH:  
EVALUATION OF BIOTELEMETRY AS STUDY METHOD, INSIGHTS ABOUT PARTIAL  
MIGRATION, AND CONSEQUENCES FOR CONSERVATION**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, área de concentração em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais em Ecossistemas Fragmentados e Agrossistemas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 15 de julho de 2022.

Dr. Marcelo Passamani, UFLA

Dr. Gustavo Hallwass, UFLA

Dr<sup>a</sup>. Lisiane Hahn, Neotropical Consultoria Ambiental

Dr. Rafael Pereira Leitão, UFMG

Prof. Dr. Paulo dos Santos Pompeu  
Orientador

Prof. Dr(a). Luis David Solis Murgas  
Coorientador

## AGRADECIMENTOS

Agradeço muito especialmente ao meu orientador, prof. Paulo dos S. Pompeu, pela inestimável competência, prontidão, presença e humor em todas as etapas e momentos que esta tese demandou. Poder contar com sua ajuda e exemplo sem dúvida tornaram esta tarefa muito mais simples.

Agradeço à um grande número de moradores e proprietários de terra ao longo de toda a margem dos rios São Francisco, Bambuí e Samburá, que em muitos casos não apenas permitiram nosso trabalho e instalações, como se tornaram grandes entusiastas deste projeto e, acima de tudo, pessoas muito estimadas por nossa equipe. Em especial, agradeço ao Dário e a Gilda, ao Sr. José Antonio (*in memoriam*), dona Dirce e família, bem como ao Sr. Marcio Antonio (*in memoriam*), a dona Maria e toda sua família pelo suporte ao projeto, mas principalmente pela boa prosa.

Agradeço, sem dúvida, aos grandes conhecedores daquele rio São Francisco, àqueles que foram os responsáveis pelas capturas de todos os peixes, e, acima de tudo, tornaram anos de trabalho de campo algo bastante prazeroso com suas histórias. Obrigado João Bosco dos Santos e José Concesso dos Santos.

Agradeço enormemente ao João Magalhães Lopes, grande conhecedor destas pias que lançou bases fundamentais para esta tese e para estudo de nossos peixes migradores, além de contribuir grandemente para todos os capítulos desta tese.

Agradeço ao co-orientador desta tese, professor Dr. Luis David Solis Murgas, que com sua notável cordialidade trouxe para este projeto procedimentos práticos e aplicações possíveis dos resultados bastante além daquilo que seria capaz de fazer sozinho.

Agradeço ao Clovis Martins Gonçalves e a Angela Costa, que foram nossa base avançada em Pompéu, resolvendo tantos problemas grandes e pequenos, e acima de tudo, nos acolhendo com sua companhia sempre agradável.

Agradeço ao amigo Francisco Ricardo Andrade Neto pela inestimável prontidão para ajuda em campo, pela insubstituível ajuda na análise de dados e, especialmente, pela ótima companhia ao decorrer de anos de trabalho de campo.

Agradeço à Gilmara Junqueira, que nos trouxe a partir de sua experiência inúmeras técnicas tão importantes para o desenvolvimento deste projeto e também pela grande companhia que foi em tantos trabalhos de campo.

Agradeço ao Ivo Gavião Prado, grande e estimada companhia sempre presente em qualquer etapa e momento, pronto pra ajudar a resolver qualquer problema.

Agradeço aos professores do programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, pela sua contribuição em disciplinas, curso de campo, banca de qualificação e tantos outros momentos engrandecedores.

Agradeço especialmente à Ellen C. Carvalho, nossa eterna secretária preferida que tanto facilitou a nossa vida resolvendo prontamente todos os nossos problemas.

Agradeço ao Carlos Bernardo Mascarenhas Alves, pela disposição em auxiliar tantas etapas fundamentais deste projeto e, sem dúvida fazer com que risse bastante quando esteve presente.

Agradeço aos pupilos, colegas tão queridos do laboratório de ecologia de peixes, que proporcionaram tantos momentos felizes em campo ou fora dele, no laboratório ou fora dele.

Agradeço aos colegas do antigo setor, atual departamento de Ecologia e Conservação, sempre de prontidão para ajudar com problemas da tese ou não, para trabalhar ou festejar. A vida foi melhor com vocês!

Finalmente e descaradamente copiando o supracitado amigo Francisco Andrade, agradeço aos peixes do rio São Francisco, cuja maravilhosa existência resiste apesar de tudo e permite a realização desta tese.

Este trabalho foi realizado nas instalações do departamento de Ecologia e Conservação da Universidade Federal de Lavras (UFLA), com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG nº 11548), via bolsa de doutorado de Alexandre Peressin, e da Companhia Energética da Minas Gerais (Cemig) via P&D ANEEL GT 612.

*Dedico esta tese aos peixes do rio São Francisco,  
especialmente àqueles que tiveram suas vidas  
invadidas para permitir a existência desta tese*

## RESUMO GERAL

Em peixes migradores de água doce, é comum que a cada estação reprodutiva alguns indivíduos decidam migrar e outros permaneçam estacionados, fenômeno conhecido como migração parcial. No entanto, os mecanismos envolvidos na migração parcial não são conhecidos em peixes neotropicais, assim como detalhes básicos do ciclo migratório de muitas espécies. Tal fato é preocupante quando observado que estes peixes são os mais relevantes para pesca e alimentação, mas também os mais ameaçados por barramentos e sobrepesca. O aprofundamento desse conhecimento demanda técnicas como a telemetria, que embora forneça dados com grande precisão, é invasiva e não tem seus efeitos conhecidos em espécies neotropicais. Assim, a partir de 60 exemplares de *Prochilodus lineatus* criados em cativeiro e divididos em três tratamentos (controle, cirurgia sem marcação e marcação) evidenciou-se que a mortalidade (25%) e rejeição (20%) são significativas, mas que, após recuperação, a capacidade reprodutiva em fêmeas marcadas é semelhante àquelas não marcadas (Artigo I). Em seguida, duas espécies de *Prochilodus* foram estudadas com radiotransmissores e coletas de ovos e larvas em ambiente natural, um trecho do rio São Francisco livre de barramentos que se estende por 450 km a montante do reservatório de Três Marias. Vinte e cinco exemplares de *P. argenteus* foram marcados em 2019 num conhecido sítio de alimentação deste trecho (Artigo II) e 200 exemplares de *P. costatus* foram marcados em 2019 e 2020 nos seus sítios de reprodução e de alimentação (Artigo III). Em ambas as espécies, 50% dos peixes realizaram migrações à montante entre final de setembro ou início de outubro até dezembro, tendo como destino sítios à montante, situados na altura da planície de inundação ou acima dela. Estes também foram os únicos locais onde foram encontrados ovos das duas espécies, evidenciando que a desova é concentrada nos indivíduos presentes nestes trechos à montante, considerados então vitais para a manutenção das populações estudadas. A janela migratória tem início após as primeiras variações positivas de nível do rio, evidenciando a íntima relação destas espécies com o padrão natural de fluxo. No entanto, fator de condição e peso não foram relevantes para a decisão de migrar em *P. costatus*. Exemplares desta espécie que migraram em estações reprodutivas consecutivas tiveram o mesmo sítio de desova como destino, caracterizando *homming* reprodutivo. Há indivíduos de *P. costatus* residentes no sítio de reprodução, porém, o fator de condição e peso dos indivíduos foram maiores no sítio de alimentação, evidenciando que estes locais oferecem melhores condições aos residentes. Por isso, recomenda-se concentrar esforços de fiscalização nos sítios de desova durante a estação reprodutiva, além de propiciar fluxo em condição natural e manter trechos livres onde populações destas espécies sejam capazes de completar seu ciclo de vida. Adicionalmente, estudos de longo prazo conduzidos no hemisfério norte têm apontado alterações no padrão migratório de peixes em resposta a alterações climáticas. Nesse sentido, é urgente monitorar anualmente a migração de peixes neotropicais visando identificar alterações em resposta a mudanças climáticas, uma vez que espécies que não se adaptam às estas mudanças são altamente vulneráveis.

**Palavras-chave:** Rio São Francisco, neotropical, reprodução intermitente, gatilhos migração, *Prochilodus argenteus*, *Prochilodus costatus*, *Prochilodus lineatus*



## GENERAL ABSTRACT

In freshwater migratory fish, it is common that at each breeding season some individuals make the decision to migrate and others remain stationary, a phenomenon known as partial migration. However, the mechanisms and details involved in partial migration are not known in Neotropical fish. Even basic details of the migratory cycle of many species are not known for these fishes. This fact is worrying when observed that migratory fishes are the most relevant for fishing and food, but also the most threatened by dams and overfishing. The deepening of this knowledge requires techniques such as telemetry, which, although it provides data with great precision, is invasive and its effects on Neotropical species behavior are not investigated. Thus, from 60 specimens of *Prochilodus lineatus* bred in captivity and divided into three treatments (control, surgery without tagging, and tagged fish) it was shown that mortality (25%) and rejection (20%) are significant. However, after recovery, the reproductive capacity of tagged females is similar to untagged ones (Article I). Then, two species of *Prochilodus* were studied with radiotransmitters and eggs and larvae samples in a natural environment, a stretch of the São Francisco River free of dams that extends for 450 km upstream of the Três Marias reservoir. Twenty-five specimens of *P. argenteus* were tagged in 2019 at a known feeding site in this stretch (Article II) and 200 specimens of *P. costatus* were tagged in 2019 and 2020 at their breeding and feeding sites (Article III). In both species, 50% of the fish migrated upstream between late September or early October to December, reaching upstream sites located at/above floodplain. These were also the only places where eggs of the two species were found, showing that spawning is concentrated in individuals present in these upstream stretches, considered vital for the maintenance of the populations studied. The migratory window starts after the first positive changes in river level, showing the close relationship of these species with the natural flow pattern. However, condition and weight factors were not relevant for the decision to migrate in *P. costatus*. Individuals of this species that migrated in consecutive breeding seasons had the same spawning site as destination, characterizing reproductive homing. There are individuals of *P. costatus* residing in the breeding site, however, the condition factor and weight of the individuals were higher in the feeding site, showing that these places offer better conditions to the residents. Therefore, it is recommended to focus inspection efforts on spawning sites during the breeding season, in addition to providing natural flow and maintaining free stretches where populations of these species are able to complete their life cycle. Additionally, long-term studies conducted in the northern hemisphere have pointed changes in the migratory pattern of fish in response to climate change. In this sense, it is urgent to annually monitor the migration of Neotropical fish in order to identify possible changes in response to climate change, since migratory species that do not adapt to these changes are highly vulnerable.

**Keywords:** São Francisco River, neotropical, intermittent reproduction, migration triggers, *Prochilodus argenteus*, *Prochilodus costatus*, *Prochilodus lineatus*

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	12
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	12
<b>CONCLUSÃO GERAL</b> .....	17
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	18
<b>SEGUNDA PARTE</b> .....	22
<b>ARTIGO 1 - RADIOTAGGING A LONG-DISTANCE MIGRATORY CHARACIFORM FISH: REPRODUCTION AFTER SURGERY, TAG LOSSES, AND EFFECTS IN WEIGHT</b> .....	22
<b>ABSTRACT</b> .....	23
<b>RESUMO</b> .....	24
<b>RUNNING HEAD</b> .....	24
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	25
<b>2. METHODOLOGY</b> .....	26
<b>2.1 Target-species</b> .....	26
<b>2.2 Experiment</b> .....	26
<b>2.3 Surgery</b> .....	27
<b>2.4 Periodic survey</b> .....	27
<b>2.5 Assessment of reproduction capacity</b> .....	28
<b>2.6 Data analysis</b> .....	29
<b>3. RESULTS</b> .....	29
<b>3.1 Mortality and tag expulsion</b> .....	30
<b>3.2 Weight variation</b> .....	31
<b>3.3 Reproductive capacity</b> .....	32
<b>4. DISCUSSION</b> .....	33
<b>4.1 Mortality and tag expulsion</b> .....	33
<b>4.2 Weight variation</b> .....	35
<b>4.3 Reproductive capacity</b> .....	36
<b>ACKNOWLEDGEMENTS</b> .....	37
<b>REFERENCES</b> .....	37
<b>ARTIGO 2 – DETAILS ON THE PARTIAL MIGRATION OF A NEOTROPICAL FISH</b> .....	42
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	44
<b>2. METHODOLOGY</b> .....	45
<b>2.1 Study sites</b> .....	45
<b>2.3 Environmental variables</b> .....	46
<b>2.4 Capture and tagging</b> .....	46
<b>2.5 Radiotelemetry monitoring</b> .....	47

2.6 Eggs and larvae sampling.....	47
2.7 DNA metabarcoding identification of eggs and larvae.....	48
2.8 Data Analysis.....	49
<b>3. RESULTS.....</b>	<b>50</b>
3.1 Radiotelemetry.....	50
3.2 Eggs and larvae.....	52
<b>4. DISCUSSION.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>57</b>
<b>ARTIGO 3 – REFINANDO O CONHECIMENTO SOBRE USO DO ESPAÇO E MIGRAÇÃO PARCIAL EM UM PEIXE NEOTROPICAL.....</b>	<b>62</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>63</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>64</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>2. MÉTODOS.....</b>	<b>66</b>
2.1 Área de estudo.....	66
2.3 Captura e marcação.....	67
2.4 Monitoramento de radiotelemetria.....	67
2.5 Amostragem de ovos e larvas.....	68
2.6 Identificação por metabarcoding de DNA de ovos e larvas.....	69
2.7 Análise de dados.....	70
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>72</b>
3.1 Radiotelemetria: Sítio de alimentação.....	73
3.2 Radiotelemetria: Sítio de desova.....	74
3.3 Fidelidade aos sítios de desova.....	75
3.4 Ovos e Larvas.....	75
<b>4. DISCUSSÃO.....</b>	<b>78</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>

## PRIMEIRA PARTE

### INTRODUÇÃO GERAL

Entre todos os fenômenos animais, a migração é certamente um dos espetáculos mais marcantes. No entanto, a migração de organismos aquáticos com exceção dos salmões tem recebido menos atenção (BRONMARK et al. 2014). Não sem motivos, Harvey & Carolsfeld (2003) afirmaram que peixes migradores neotropicais são um segredo muito bem guardado. Quando esta afirmação foi feita já se sabia em linhas gerais quando e para onde aconteciam os deslocamentos, especialmente reprodutivos. No entanto, inúmeros detalhes fundamentais como momento exato da partida, tempo dispendido pelos indivíduos em cada habitat, proporção de migrantes na população, se peixes residentes desovam ou não e *homming* reprodutivo e alimentar, eram desconhecidos. Com o início do uso da telemetria no continente sul-americano, principalmente no Brasil (GODINHO et al. 2006; GODINHO & KYNARD, 2006; HAHN et al. 2007; 2011; 2020; LOPES et al. 2018; 2019A; 2019B; 2021; PESOA & SCHULZ, 2010), informações importantes foram obtidas com maior precisão para algumas espécies, incluindo descrição do período gasto em cada tipo de habitat ao longo do ciclo de vida, duração da janela migratória, gatilhos ambientais da migração, *homming*, velocidade migratória, eficiência de sistemas de transposição e orientação em grandes reservatórios, mas apenas para algumas espécies. Adicionalmente, remanescem questões como padrão de uso do habitat, fatores que levam a decisão individual de migrar ou não, e outros detalhes relacionados ao comportamento migratório parcial.

Apesar desta lacuna de conhecimento sobre os peixes migradores neotropicais, sua importância nas bacias onde estão presentes é enorme, normalmente representando as espécies de maior porte e mais valorizadas por todo tipo de pesca, seja com fins econômicos ou de lazer, sendo capturados por inúmeras técnicas, muitas delas altamente locais e culturais (CAMARGO & PETRERE, 2001; DUGAN et al. 2010; GODINHO & GODINHO 2003; HARVEY & CAROLSFELD, 2003; OBRIEN et al. 2019; VU et al. 2022). A relevância ecológica destas espécies não é menor: curimbas do gênero *Prochilodus*, por exemplo, podem representar mais da metade da biomassa das bacias onde estão presentes. Como detritívoros, realizam a ciclagem de nutrientes em todas as grandes bacias neotropicais (BOWEN, 1983; 2022), sendo, por isso, considerados engenheiros de ecossistemas (FLECKER, 1996). Ao se movimentarem por longas extensões, peixes migradores promovem também transferência de matéria orgânica e nutrientes ao longo de toda a bacia, tendo papel crítico no funcionamento e estabilidade de ecossistemas (BRONMARK et al. 2014; DUPONCHELLE et al. 2021).

Assim como sua importância econômica, ecológica e social, às ameaças presentes são também bastante significativas (DUPONCHELLE et al. 2021), destacando-se entre elas a regulação de vazão, alterações limnológicas e bloqueio de rotas migratórias causados por barragens (DUDGEON et al. 2006; REID et al. 2018). Estudos recentes dão conta de uma estreita e íntima relação com variáveis ambientais como variações naturais de fluxo que funcionam como gatilhos para a decisão de migrar e se reproduzir, determinando também o sucesso do recrutamento (FICKE et al. 2007; LOPES et al. 2018; REYNALTE-TATAJE et al. 2012). Mesmo que existam populações remanescentes de peixes migradores em remanescentes lóticos curtos entre barramentos (AGOSTINHO et al. 2003; REYNALT-TATAJE et al. 2012), é fato que as maiores capturas ocorrem em trechos de rio livre mais longos, como no trecho central do rio São Francisco que corre desimpedido por mais de 1000 km (SATO & GODINHO, 2003), ou em trechos que possuem sfluentes com sítios de desova e fluxo livre. Alterações de fluxo causados pela presença de barramentos, além de afetar gatilhos da migração e condições de recrutamento, também podem alterar a dinâmica da deposição de sedimentos (POFF et al. 1997; REID et al. 2018), modificando a oferta de alimentos para peixes detritívoros. Tais impactos oriundos de barramentos são especialmente preocupantes num país como o Brasil, que gera mais de 60% de sua energia elétrica em usinas hidrelétricas (ANEEL, 2014). Adicionalmente, certas populações de salmões já começam a mostrar alterações de comportamento relacionadas com mudanças climáticas (AREVALO et al. 2021), impacto este que não está sendo investigado em peixes neotropicais.

Contudo, apesar da lacuna no conhecimento e das ameaças, não é justo dizer que não há ao menos alguma preocupação da sociedade com a conservação destes animais. Diversas medidas têm sido tomadas, com destaque para sistemas de transposição de peixes (STPs) (OBRIEN et al. 2019; SILVA et al. 2018; XU et al. 2020), que viraram leis em diversos estados. Mas muito menos é correto dizer que elas garantem a conservação, apesar dos esforços: inúmeros estudos tem mostrados a ineficiência desta estratégia em basicamente todas as partes do mundo (BIRNIE GAUVIN et al. 2017, BROWN et al. 2013; DUGAN et al. 2010; REID et al. 2018, POMPEU et al. 2012). Nos STPs, o problema começa em simplesmente possibilitar passagem das espécies alvo, o que frequentemente não acontece (HAHN et al. 2020). Quando há passagem, sabe-se que os peixes frequentemente não atingem os pontos de desova à montante, quando estes ainda existem, por se perderem no reservatório (LOPES et al. 2021). Ainda que todos estes obstáculos sejam transpostos, é improvável que os adultos consigam retornar para seus sítios de alimentação à jusante, uma vez que grandes reservatórios funcionam como barreiras para a migração descendente (PELICICE et al. 2015).

Estudos recentes indicam que esta falha dos mecanismos de mitigação conhecidos atualmente pode ser creditada a uma complexidade de ciclo de vida maior que a conhecida anteriormente (LOPES et al. 2019A). Parte desta complexidade se deve ao comportamento migratório parcial, aquele em que, a cada estação reprodutiva, parte da população decide migrar e outra parte permanece estacionada, sendo que estes últimos podem ou não se reproduzir, dependendo da espécie (CHAPMANN et al. 2011). O tipo de migração parcial mais comum em peixes de água doce é a reprodução intermitente, que acontece quando indivíduos que não migram também não se reproduzem (SHAW & LEVIN, 2011; 2013). Neste caso, animais que não atingem os pontos de reprodução simplesmente postergam a desova, resultando em um processo em que anualmente cada indivíduo decide se irá migrar e se reproduzir ou não (CHAPMAN et al. 2011). Para peixes do hemisfério norte, sabe-se que condição corporal (BRODERSEN et al. 2008), formato do corpo (CROSSIN et al. 2004), tamanho (CHAPMAN et al. 2011; KEEFER et al. 2009) e genética (MAGGS & COWLEY, 2016) são importantes para esta decisão, mas não temos esta informação para peixes neotropicais. No entanto, há fortes indícios de que possibilidade de sucesso da prole é um fator decisivo para peixes neotropicais (AGOSTINHO et al. 2003; LOPES et al. 2018; REYNALTE-TATAJE et al. 2012). Entender todo o processo envolvido na tomada decisão entre migrar ou não para se reproduzir é essencial para prever possíveis impactos de mudanças ambientais em geral (BIRNIE-GAUVIN et al. 2021), incluindo aquecimento global e outros impactos antrópicos diretos, como regulação de vazão, alterações limnológicas e bloqueio de rotas migratórias causados por barragens (DUDGEON et al. 2006; REID et al. 2018).

O aprofundamento do conhecimento sobre migração demanda técnicas avançadas, como a biotelemetria, que ao longo das últimas décadas se mostrou muito útil neste aprofundamento do conhecimento sobre peixes migradores (COOKE et al. 2013). No entanto, a biotelemetria é também uma técnica invasiva, uma vez que o método mais apropriado geralmente é a laparotomia (WILSON et al. 2017). Por outro lado, estudar migração por telemetria implica assumir que o comportamento dos peixes marcados é igual aos dos peixes não marcados, mas sabe-se que a marcação pode ter inúmeras consequências que variam entre espécies e são melhor conhecidas apenas para peixes do hemisfério norte, especialmente salmões (COOKE et al., 2011). A mortalidade pode variar de insignificante até 100% dos peixes marcados (CLOSE et al. 2003; MITAMURA et al. 2006; OKLAND et al. 2003) o que obviamente pode impactar os resultados de um estudo. No entanto, poucos estudos tem avaliado efeitos da marcação com transmissores em países tropicais (MITAMURA et al.

2006; OKLAND et al. 2003; THORSTAD et al. 2009; SCHULZ 2003; LOPES et al. 2016), sendo estes estudos inexistentes quanto à capacidade reprodutiva. Por isso, há grande necessidade de avaliar efeitos da marcação, especialmente mortalidade e reprodução em peixes neotropicais.

Para aprofundar este conhecimento, também é necessário um trecho de rio livre longo o suficiente para estudar o comportamento migratório natural destes peixes. Com cerca de 2860 km de extensão, correndo no sentido sul-norte-leste até o oceano Atlântico (LOURES & POMPEU, 2012) o rio São Francisco é um dos maiores do mundo. A primeira grande usina hidrelétrica de sua calha principal é a UHE Três Marias, construída para regularização de cheias e produção hidrelétrica em 1962, contando com um reservatório de 1090 km<sup>2</sup> (CEMIG, 2006). A montante do reservatório desta hidrelétrica situa-se o trecho escolhido para este estudo, um remanescente lótico que se estende por aproximadamente 450 km de rio livre, desde o início do reservatório de Três Marias até as cabeceiras de seus tributários formadores, sendo eles sua nascente histórica, o próprio rio São Francisco, e sua nascente geográfica, o rio Samburá (SILVA et al. 2003). Neste trecho, a pioa *Prochilodus costatus* (Figura 1A) teve seu comportamento migratório investigado nos últimos anos LOPES et al. (2018; 2019A; B, 2021), mostrando que a espécie completa seu ciclo de vida neste trecho, apresentando migrações conspícuas entre sítios de alimentação situados à jusante e sítios de desova localizados à montante. Estes estudos prévios tornaram o trecho e a espécie um ótimo modelo para aprofundamento do conhecimento sobre migração de peixes em ambiente natural. No entanto, entre a rica fauna de ao menos 240 espécies de peixes do rio São Francisco (BARBOSA & SOARES, 2009), há outras seis além de *P. costatus* consideradas grandes migradoras, entre elas *Brycon orthothenia*, *Conorhynchus conirostris*, *Megaleporinus obtusidens*, *Prochilodus argenteus*, *Pseudoplatystoma corruscans* e *Salminus franciscanus* (SATO & GODINHO 2003). Segundo relatos informais de pescadores da região, todas eram presentes na pesca do trecho escolhido, mas de muitas delas restam apenas frações muito localizadas, tendo, na prática, desaparecido das capturas da pesca profissional. Com isso, a curimatá-pacú *Prochilodus argenteus* também se tornou alvo desta tese (Figura 1B), principalmente pelo fato de ainda ser capturado com alguma facilidade na região.

Figura 1 - Pioa *Prochilodus costatus* (FotoA) e Curimatá-Pacú *Prochilodus argenteus* (Foto B), também conhecida na região como zulega.



Fonte: A - Foto do autor, ago/2016; B – Carlos Bernardo Mascarenhas Alves, ago/2010)

Assim, com o intuito de acrescentar conhecimento sobre técnica da telemetria, bem como sobre o comportamento migratório natural, em especial padrões temporais e espaciais de migração, e fatores envolvidos na tomada de decisão sobre a migração, esta tese divide-se em 3 capítulos. No primeiro é investigada a técnica a ser utilizada, verificando mortalidade, rejeição, variações de peso e possíveis alterações na fecundidade e fertilidade dos peixes marcados. No segundo, a telemetria é utilizada em campo, conjugada à amostragem de ovos e larvas, para estudar *traits* migratórios de *Prochilodus argenteus*, comparando o comportamento migratório desta espécie com sua congênere simpátrica melhor conhecida, a pioa *P. costatus*. Tal comparação visa encontrar *traits* compartilhados que poderiam facilitar estratégias de conservação comuns a ambas. Finalmente, o terceiro capítulo busca aprofundar ainda mais o conhecimento sobre *P. costatus* com foco nas implicações conservacionistas deste aprofundamento, identificando sítios de desova que mantem a população de toda a bacia, possível fidelidade aos sítios de reprodução, gatilhos da migração e possíveis fatores individuais que influenciam a decisão de migrar.



## CONCLUSÃO GERAL

O primeiro capítulo quantifica perdas resultantes da marcação com radiotransmissores em *Prochilodus lineatus* criados em cativeiro, um dos peixes migradores neotropicais mais bem estudados e modelo de estudos para migradores. As perdas relatadas por morte (25%) e rejeição (20%) são razoavelmente altas, mas não surpreendentes, mostrando que as perdas devem ser consideradas ao planejar o número amostral de peixes marcados em estudos de biotelemetria. Por outro lado, mostra também bons indícios de que peixes marcados com radiotransmissores tem grande probabilidade de manter seu comportamento reprodutivo natural, uma vez que fêmeas marcadas foram capazes de maturar suas gônadas, desovar e tendo fecundidade semelhantes a fêmeas não marcadas.

No segundo capítulo, evidencia-se também que a migração de *P. argenteus*, embora estudada apenas um ano e em número menor, parece ser de fato muito semelhante à da pioa, considerando o período da janela migratória a montante, início da migração disparado pela subida de nível do rio enquanto este ainda está bastante baixo, janela de retorno aos sítios de alimentação, sítios de desova situados na calha principal e nos principais tributários acima da planície de inundação e distância migrada. Há outro resultado importante: a distribuição dos ovos indica que apenas peixes presentes nos sítios de reprodução desovam, indicando que toda a população de todo o trecho lótico à montante do reservatório de três Marias é mantido por poucos sítios de desova em trechos de tributários relativamente pequenos. Estes resultados reforçam a dependência destas espécies em relação ao ciclo hidrológico natural e presença de habitats essenciais (eg. Sítios de alimentação e desova) conectados.

No terceiro e último capítulo, sobre a pioa, conclui-se que a proporção de peixes que migram não variou entre os dois anos de estudo, permanecendo sempre em 50% como em *P. argenteus*, sendo que peso, fator de condição, fase da lua e precipitação não influenciaram a decisão de migrar. Estes peixes realizaram migrações reprodutivas entre 100-392km à montante, iniciadas sempre entre fim de setembro ou início de outubro e podendo se estender até dezembro dependendo do ano, também tendo como destino os mesmos trechos a montante. O sítio de reprodução recebeu peixes oriundos de praticamente todas as partes do trecho livre, mas há também peixes que são residentes nestes locais. Com isso, toda a bacia pode ser considerada um sítio de alimentação, mas poucos pontos a montante são responsáveis por basicamente toda a reprodução. No entanto, o peso e fator de condição dos peixes do sítio de reprodução é menor que daqueles do sítio de alimentação, indicando que, embora peixes residentes no sítio de desova não precisariam realizar migrações, as condições

de alimentação longe deles são melhores. Poucos peixes tiveram migrações detectadas em duas ou mais estações reprodutivas, mas estes o fizeram sempre para o mesmo ponto.

Os resultados aqui apresentados indicam que há alta fidelidade aos sítios de desova e alimentação, o que poderia dificultar a adaptação de novas rotas em caso de bloqueio. Uma vez que as espécies aqui estudadas exibem grande sincronia do seu ciclo de vida com o fluxo natural, dependendo deste para sucesso da migração e do recrutamento, é necessário que ambientes apresentem, além da conexão entre sítios essenciais, variações temporais e espaciais naturais de fluxo que deveriam ser simuladas em caso de rios com barramentos (REID *et al.*, 2018). Adicionalmente, a dependência do ciclo natural somada à fidelidade aos sítios essenciais demonstram alta adaptação local da população e impõem dificuldades adicionais aos sistema de transposição e peixamentos, uma vez que populações oriundas de outros locais demonstram não ter capacidade de se adaptar aos gatilhos e sítios essenciais do novo local (LOPES *et al.* 2021). Com isso, simulação de impactos de novas barragens indica que estas causariam colapso reprodutivo da população segregada à jusante e possível diminuição do tamanho dos peixes segregados à montante. Ainda, toda a bacia pode ser considerada um sitio de alimentação, mas poucos sítios de reprodução à montante da planície de inundação são essenciais para manutenção de toda população do trecho. Por isso, seria desejável atenção especial a estes locais, por exemplo concentrando o esforço de agentes de fiscalização ambiental durante o período reprodutivo, especialmente entre outubro e dezembro. Estudos de longo prazo tem evidenciado que o comportamento migratório das espécies pode ser alterado pelas mudanças climáticas e que as espécies que não exibem estas adaptações sofrem declínios populacionais (AREVALO *et al.* 2021; FICKE *et al.* 2007; MOLLER *et al.* 2008). Por isso, é essencial implementar monitoramento regular da migração dos peixes neotropicais, completamente inexistente atualmente. Finalmente, restam ainda muitas perguntas a serem respondidas, como por exemplo, se o grupo trófico, o sexo e morfologia corporal influenciam o comportamento migratório. Identificar mecanismos fisiológicos e endócrinos envolvidos na regulação da migração também seriam um grande avanço no estudo de peixes migratórios neotropicais.

## REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, Angelo Antônio *et al.* Migratory fishes of the upper Paraná River basin, Brazil. **CAROLSFELD, J.; HARVEY, B.; ROSS, C**, p. 19-98, 2003.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2014). <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em 15/09/2014

- AREVALO, Elorri et al. Does global change increase the risk of maladaptation of Atlantic salmon migration through joint modifications of river temperature and discharge?. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 288, n. 1964, p. 20211882, 2021.
- BARBOSA, José Milton; SOARES, Emerson Carlos. Perfil da ictiofauna da bacia do São Francisco: estudo preliminar. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 4, n. 1, p. 155-172, 2009.
- BIRNIE-GAUVIN, Kim et al. Life-history strategies in salmonids: the role of physiology and its consequences. **Biological Reviews**, v. 96, n. 5, p. 2304-2320, 2021.
- BIRNIE-GAUVIN, Kim et al. Shining a light on the loss of rheophilic fish habitat in lowland rivers as a forgotten consequence of barriers, and its implications for management. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 27, n. 6, p. 1345-1349, 2017.
- BOWEN, Stephen H. Detritivory in neotropical fish communities. **Environmental Biology of Fishes**, v. 9, n. 2, p. 137-144, 1983.
- BOWEN, Stephen H. The river flood pulse, benthic biofilm, and the nutrition of *Prochilodus lineatus*. **Environmental Biology of Fishes**, p. 1-18, 2022.
- BRODERSEN, Jakob et al. Condition-dependent individual decision-making determines cyprinid partial migration. **Ecology**, v. 89, n. 5, p. 1195-1200, 2008.
- BRÖNMARK, Christer et al. There and back again: migration in freshwater fishes. **Canadian Journal of Zoology**, v. 92, n. 6, p. 467-479, 2014.
- BROWN, J. Jed et al. Fish and hydropower on the US Atlantic coast: failed fisheries policies from half-way technologies. **Conservation Letters**, v. 6, n. 4, p. 280-286, 2013.
- CAROLSFELD, Joachim et al. Migratory fishes of South America. **World Fisheries Trust, Victoria, BC**, 2003.
- CHAPMAN, Ben B. et al. The ecology and evolution of partial migration. **Oikos**, v. 120, n. 12, p. 1764-1775, 2011.
- CLOSE, David A. et al. Effects of intraperitoneally implanted radio transmitters on the swimming performance and physiology of Pacific lamprey. **North American Journal of Fisheries Management**, v. 23, n. 4, p. 1184-1192, 2003.
- COOKE, Steven J. et al. Advancing the surgical implantation of electronic tags in fish: a gap analysis and research agenda based on a review of trends in intracoelomic tagging effects studies. **Reviews in Fish Biology and Fisheries**, v. 21, n. 1, p. 127-151, 2011.
- COOKE, Steven J. et al. To tag or not to tag: Animal welfare, conservation, and stakeholder considerations in fish tracking studies that use electronic tags. **Journal of International Wildlife Law & Policy**, v. 16, n. 4, p. 352-374, 2013.
- CROSSIN, Glenn Terrence et al. Energetics and morphology of sockeye salmon: effects of upriver migratory distance and elevation. **Journal of Fish Biology**, v. 65, n. 3, p. 788-810, 2004.
- DE CAMARGO, SA Franco; PETRERE JR, M. Social and financial aspects of the artisanal fisheries of Middle São Francisco River, Minas Gerais, Brazil. **Fisheries Management and Ecology**, v. 8, n. 2, p. 163-171, 2001.
- DE MAGALHÃES LOPES, João et al. Influence of rainfall, hydrological fluctuations, and lunar phase on spawning migration timing of the Neotropical fish *Prochilodus costatus*. **Hydrobiologia**, v. 818, n. 1, p. 145-161, 2018.
- DE MINAS GERAIS, CEMIG–Companhia Energética. Livro Usinas da Cemig: A história da eletricidade em Minas e no Brasil. **Paulo Brandt de Barros Cachapuz. Rio de Janeiro**, 2006.

- DUDGEON, David et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. **Biological reviews**, v. 81, n. 2, p. 163-182, 2006.
- DUGAN, Patrick J. et al. Fish migration, dams, and loss of ecosystem services in the Mekong basin. **Ambio**, v. 39, n. 4, p. 344-348, 2010.
- DUPONCHELLE, Fabrice et al. Conservation of migratory fishes in the Amazon basin. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 31, n. 5, p. 1087-1105, 2021.
- FICKE, Ashley D.; MYRICK, Christopher A.; HANSEN, Lara J. Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. **Reviews in Fish Biology and Fisheries**, v. 17, n. 4, p. 581-613, 2007.
- FLECKER, Alexander S. Ecosystem engineering by a dominant detritivore in a diverse tropical stream. **Ecology**, v. 77, n. 6, p. 1845-1854, 1996.
- GODINHO, Alexandre L.; KYNARD, Boyd. Migration and spawning of radio-tagged zulega *Prochilodus argenteus* in a dammed Brazilian river. **Transactions of the American Fisheries Society**, v. 135, n. 3, p. 811-824, 2006.
- GODINHO, Alexandre L.; KYNARD, Boyd; GODINHO, Hugo P. Migration and spawning of female surubim (*Pseudoplatystoma corruscans*, Pimelodidae) in the São Francisco river, Brazil. **Environmental Biology of Fishes**, v. 80, n. 4, p. 421-433, 2007.
- GODINHO, Alexandre Lima; GODINHO, Hugo Pereira. Breve visão do São francisco. **Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais. Belo Horizonte: PUC Minas**, v. 468, p. 15-23, 2003.
- HAHN, Lisiane et al. Preliminary study on the application of radio-telemetry techniques to evaluate movements of fish in the Lateral canal at Itaipu Dam, Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v. 5, p. 103-108, 2007.
- HAHN, Lisiane et al. Semi-natural fishway efficiency for goliath catfish (*Brachyplatystoma* spp.) in a large dam in the Amazon Basin. **Hydrobiologia**, p. 1-16, 2020.
- HAHN, Lisiane et al. Use of radiotelemetry to track threatened dorados *Salminus brasiliensis* in the upper Uruguay River, Brazil. **Endangered Species Research**, v. 15, n. 2, p. 103-114, 2011.
- KEEFER, Matthew L. et al. Effects of body size and river environment on the upstream migration of adult Pacific lampreys. **North American Journal of Fisheries Management**, v. 29, n. 5, p. 1214-1224, 2009.
- LOPES, Joao de Magalhaes et al. Dazed and confused: Behavioural constraints impose major challenges to fish passage in the neotropics. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 31, n. 12, p. 3403-3415, 2021.
- LOPES, João de Magalhães et al. The critical importance of an undammed river segment to the reproductive cycle of a migratory Neotropical fish. **Ecology of Freshwater Fish**, v. 28, n. 2, p. 302-316, 2019 A.
- LOPES, João de Magalhães et al. Upstream and downstream migration speed of *Prochilodus costatus* (Characiformes: Prochilodontidae) in upper São Francisco basin, Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v. 17, 2019 B.
- LOPES, João M. et al. Effect of anesthetic, tag size, and surgeon experience on postsurgical recovering after implantation of electronic tags in a neotropical fish: *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1837)(Characiformes: Prochilodontidae). **Neotropical Ichthyology**, v. 14, 2016.
- LOURES, Raquel Coelho; POMPEU, Paulo Santos. Temporal variation in fish community in the tailrace at Três Marias hydroelectric dam, São Francisco River, Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v. 10, n. 4, p. 731-740, 2012.

- MAGGS, J. Q.; COWLEY, P. D. Nine decades of fish movement research in southern Africa: a synthesis of research and findings from 1928 to 2014. **Reviews in Fish Biology and Fisheries**, v. 26, n. 3, p. 287-302, 2016.
- MITAMURA, Hiromichi et al. Comparison of two methods of attaching telemetry transmitters to the Mekong giant catfish, *Pangasianodon gigas*. **Zoological Science**, v. 23, n. 3, p. 235-238, 2006.
- MØLLER, Anders Pape; RUBOLINI, Diego; LEHIKONEN, Esa. Populations of migratory bird species that did not show a phenological response to climate change are declining. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 42, p. 16195-16200, 2008.
- O'BRIEN, Gordon C. et al. River connectivity and fish migration considerations in the management of multiple stressors in South Africa. **Marine and Freshwater Research**, v. 70, n. 9, p. 1254-1264, 2019.
- ØKLAND, F. et al. Learning from unsuccessful radio tagging of common carp in a Namibian reservoir. **Journal of Fish Biology**, v. 62, n. 3, p. 735-739, 2003.
- PELICICE, Fernando M.; POMPEU, Paulo S.; AGOSTINHO, Angelo A. Large reservoirs as ecological barriers to downstream movements of Neotropical migratory fish. **Fish and Fisheries**, v. 16, n. 4, p. 697-715, 2015.
- POFF, N. LeRoy et al. The natural flow regime. **BioScience**, v. 47, n. 11, p. 769-784, 1997.
- POMPEU, Paulo dos S.; AGOSTINHO, Angelo A.; PELICICE, Fernando M. Existing and future challenges: the concept of successful fish passage in South America. **River Research and Applications**, v. 28, n. 4, p. 504-512, 2012.
- REID, Andrea J. et al. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. **Biological Reviews**, v. 94, n. 3, p. 849-873, 2019.
- REYNALTE-TATAJE, David A. et al. Spawning of migratory fish species between two reservoirs of the upper Uruguay River, Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v. 10, n. 4, p. 829-835, 2012.
- SATO, Yoshimi; GODINHO, Hugo P. Migratory fishes of the São Francisco river. **CAROLSFELD, J.; HARVEY, B.; ROSS, C.**, p. 195-232, 2003.
- SCHULZ, U. H. Effects of surgically implanted dummy transmitters on the South American catfish Jundiá (*Rhamdia quelen*). **Brazilian Journal of Biology**, v. 63, p. 345-348, 2003.
- SHAW, Allison K.; LEVIN, Simon A. The evolution of intermittent breeding. **Journal of Mathematical Biology**, v. 66, n. 4, p. 685-703, 2013.
- SHAW, Allison K.; LEVIN, Simon A. To breed or not to breed: a model of partial migration. **Oikos**, v. 120, n. 12, p. 1871-1879, 2011.
- SILVA, Ana T. et al. The future of fish passage science, engineering, and practice. **Fish and Fisheries**, v. 19, n. 2, p. 340-362, 2018.
- SILVA, PAULO AFONSO et al. Determinação da extensão do rio São Francisco. **XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 393-394, 2003.
- THORSTAD, Eva B. et al. Long-term effects of two sizes of surgically implanted acoustic transmitters on a predatory marine fish (*Pomatomus saltatrix*). **Marine and Freshwater Research**, v. 60, n. 2, p. 183-186, 2009.
- WILSON, Alexander DM et al. Do intracoelomic telemetry transmitters alter the post-release behaviour of migratory fish?. **Ecology of Freshwater Fish**, v. 26, n. 2, p. 292-300, 2017.
- XU, Zhihao et al. Modeling framework for reservoir capacity planning accounting for fish migration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 146, n. 3, p. 04020006, 2020.

## SEGUNDA PARTE

### ARTIGO 1 - RADIOTAGGING A LONG-DISTANCE MIGRATORY CHARACIFORM FISH: REPRODUCTION AFTER SURGERY, TAG LOSSES, AND EFFECTS IN WEIGHT

Alexandre Peressin<sup>1,2</sup>, João de Magalhães Lopes<sup>3</sup>, Alessandra Gomes Bedore<sup>4</sup>, Carlos  
Bernardo Mascarenhas Alves<sup>5</sup>, Ivo Gavião Prado<sup>2,6</sup> and Paulo Santos Pompeu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ecologia e Conservação, Instituto de Ciências Naturais, Universidade Federal de Lavras, 37200-900 Lavras, MG, Brazil. (AP) [alexandre.peressin@gmail.com](mailto:alexandre.peressin@gmail.com), ORCID; <https://orcid.org/0000-0003-0026-1713> (Corresponding author); (PSP) [pompeu@ufla.br](mailto:pompeu@ufla.br), ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7938-1517>

<sup>2</sup>Programa Peixe Vivo - Cemig Geração e Transmissão S.A. Av. Barbacena, 1200, Santo Agostinho, 30190-131 Belo Horizonte, MG, Brazil

<sup>3</sup>Saneamento de Goiás – SANEAGO, Av. Antônio Torquato, 735, 75715-000 Ouvidor, GO, Brazil. [joaomagalopes@gmail.com](mailto:joaomagalopes@gmail.com), ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9558-0025>

<sup>4</sup>Programa de Pós-Graduação em Genética, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil. [alessandragomesbedore@gmail.com](mailto:alessandragomesbedore@gmail.com), ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5461-058x>

<sup>5</sup>Bio-Ambiental - Consultoria em Meio Ambiente Ltda, R. Rio de Janeiro, 1758/902, Lourdes, 30160-042 Belo Horizonte, MG, Brazil, [cbmalves@gmail.com](mailto:cbmalves@gmail.com), ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1731-6541>

<sup>6</sup>Pisces - Consultoria e Serviços Ambientais Ltda, R. Comandante Vilas Boas, 35, Jardim Floresta, 37200-000 Lavras, MG, Brazil, [ivogaviaoprado@gmail.com](mailto:ivogaviaoprado@gmail.com), ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8699-1156>

(Artigo publicado na *Neotropical Ichthyology*,  
<https://doi.org/10.1590/1982-0224-2020-0097>)

**ABSTRACT**

Although biotelemetry studies bring useful information, tagging is a highly invasive procedure. For this reason, we assess if intracoelomic tagging alters survivorship, weight gain and/or reproductive capacity of a neotropical migratory fish. In August 2016, 60 fish were equally and randomly distributed among 3 treatments: Control (anesthesia), sham surgery (anesthesia and surgery), and true surgery (anesthesia, surgery and tagging). Surveys for weight and tag expulsion were performed periodically from surgery through spawning (November/2016), with a final survey occurring in May/2017. Mortality was higher in true surgery (25% died) and for males. Twenty percent expelled tags, and initial weight loss followed by gain were verified for all treatments. Females of all treatments spawned, and fecundity and fertility were not different. Then, future studies should consider the losses due to death and tag expulsion when defining the sample number. We also encourage further investigations about differences in mortality between sex and weight variation, as well as any other factor that leads to increase in mortality. This is the first study that investigated tagging effects in reproduction of neotropical fishes, and since the methods and tags used are not species-specific, we infer that similar effects could occur in other species.

**Keywords:** Biotelemetry, Fecundity, Fertility, *Prochilodus lineatus* Weight variation

## RESUMO

Embora estudos de biotelemetria gerem informações úteis, processos de marcação são invasivos. Por isso, avaliamos se a marcação intracelomática altera sobrevivência, ganho de peso e/ou capacidade reprodutiva de um peixe migrador neotropical. Em agosto de 2016, 60 peixes foram distribuídos igualmente e aleatoriamente entre os tratamentos controle (anestesia), cirurgia-falsa (anestesia e cirurgia) e cirurgia-verdadeira (anestesia, cirurgia e marcação). Vistorias para pesagem e observação de expulsão de marcas foram realizadas periodicamente da cirurgia até a desova (novembro/2016), com uma vistoria final em maio/2017. A mortalidade foi maior nos peixes marcados (25% morreram) e entre machos. Vinte por cento expulsaram as marcas e, para todos os tratamentos, foi observado perda de peso inicial com posterior recuperação. Fêmeas de todos os tratamentos desovaram; fecundidade e fertilidade não foram diferentes. Novos estudos devem considerar as perdas de marcas por mortalidade e rejeição na definição do número amostral. Também recomendamos estudos que investiguem a mortalidade diferencial entre sexos e variação de peso, bem como fatores causadores de mortalidade. Este é o primeiro estudo que investigou efeitos da marcação na reprodução de peixes neotropicais e, uma vez que métodos e marcas utilizadas não são espécie-específicos, inferimos que efeitos similares podem ocorrer em outras espécies.

**Palavras-Chave:** Biotelemetria, Fecundidade, Fertilidade, *Prochilodus lineatus*, Variação de peso

## RUNNING HEAD

Fish reproduction and tag losses



## 1. INTRODUCTION

Biotelemetry data has revolutionized the study of ecology, management and conservation of wildlife fishes (Cooke *et al.*, 2013), especially when considering migratory behavior. Most of such biotelemetry studies have aimed to assess migratory patterns in reproductive seasons (Rustadbakken *et al.*, 2004; Godinho, Kynard, 2006; Godinho *et al.*, 2006; Crossin *et al.*, 2009; Lopes *et al.*, 2018a) and assumed that the behavior of tagged fish is similar to non-tagged individuals. While many techniques exist for fish tagging, laparotomy – the surgical procedure to intracoelomically introduce a transmitter – is commonly the most appropriate (Jepsen *et al.*, 2002, Brown *et al.*, 2009). Despite this, the implantation of transmitters by intracoelomic surgery is highly invasive (Wilson *et al.*, 2016).

The handling and surgery procedures can affect the health of the tagged fish, causing infections and physiological problems, altering behavior and even leading to death (Cooke *et al.*, 2011; Lopes *et al.*, 2016; Wilson *et al.*, 2016). The vast majority of studies using fish tagging are conducted in northern hemisphere countries and target salmon species (Cooke *et al.*, 2011), which has been called salmo-centric science (Birnie-Gauvin *et al.*, 2019). Just a few studies have investigated the effects of intracoelomic fish tagging in tropical and less economically developed countries (Okland *et al.*, 2003; Mitamura *et al.*, 2006; Thorstad *et al.*, 2009), with only two focusing on Neotropical fishes (Schulz, 2003; Lopes *et al.*, 2016).

The knowledge available about tagging success reports a highly variable range of results, depending on the species studied. Mortality ranges from 0 – 100%, as well as tag expulsion, and conclusions about the best tagging technique are also highly variable (Close *et al.*, 2003; Okland *et al.*, 2003; Mitamura *et al.*, 2006). Although the central knowledge generated from species of salmon could be used for adaptation of surgery techniques, it is fundamental to conduct studies about other species in different world regions and climates in order to refine tagging techniques and knowledge (Cooke *et al.*, 2011).

Fish tagging procedures cause stress (Close *et al.*, 2003), which can have negative consequences to reproduction in teleosts (Schreck *et al.*, 2001). The presence of tags can compromise muscle contraction and block spawning, causing egg retention (Berejikian *et al.*, 2007). Additionally, fecundity relies directly on space available in the coelomic cavity (Wootton, 1992), so reductions in fecundity of tagged fish is expected. However, fewer studies have investigated effects of laparotomy tagging in reproduction (Baras *et al.*, 2000; Close *et al.*, 2003; Berejikian *et al.*, 2007), and none of them on Neotropical fishes. So, there is a need to investigate the effects of tagging in reproduction, especially in mature fish during the reproductive season, usually the focus of biotelemetry studies (Cooke *et al.*, 2011).

Data about fish ecology and reproductive behavior are very important for planning management and conservation measures, so any partiality in information caused by preferred study techniques could lead to inadequate actions (Brown *et al.*, 2010; Wilson *et al.*, 2016). Thus, considering the importance of biotelemetry in understanding the life cycle of fish and possible physiologic changes resulting from intracoelomic implantation of transmitters, we aimed to investigate if: i.) There are differences in mortality between fish subjected to surgery and/or due to the presence of transmitter; ii.) tagging procedures interfere with weight gain; and iii.) Fecundity and fertility are altered by surgery and/or due to the presence of a transmitter.

## **2. METHODOLOGY**

### **2.1 Target-species**

The curimba *Prochilodus lineatus* (Valenciennes 1837) is a native species from the Paraná River basin (Langeani *et al.*, 2007). Considered long distance migrants (Agostinho *et al.*, 2003; Lopes *et al.*, 2018b), species of this genus usually represent most of the fish biomass in many South American river basins (Bowen, 1983). In the lower Paraná river basin, *P. lineatus* makes up to 95% of commercial fish catch (Espinach-Ros, Delfino, 1993). Although scientific publications on biotelemetry are yet rare in South America, many of these studies are related to *Prochilodus* spp. (Godinho, Kynard, 2006; Hahn *et al.*, 2007; Pesoa, Schulz, 2010; Silva, 2012; Hahn *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2018a; Lopes *et al.*, 2018b; Lopes *et al.*, 2019). Voucher specimens (CI-UFLA 786-787) were deposited in the Coleção Ictiológica Universidade Federal de Lavras.

### **2.2 Experiment**

The experiment was carried out at Estação Ambiental de Volta Grande hatchery (EAVG), located in the Volta Grande hydropower plant area, Grande River, upper Paraná River basin. In august 16 th, 2016, 60 individuals of *P. lineatus* were removed with seine nets from a 200 m<sup>2</sup> pond and randomly distributed across six separate 2000-L tanks, without any weight or sex selection. Fishes were hatchery-reared in EAVG, so they were acclimated to water conditions including temperature and feed type. From this moment on, fish were not feed until they returned to the 200 m<sup>2</sup> ponds. After sorted for treatment, each fish was anesthetized with Eugenol (clove oil) (0.050 ml/L) in an individual 30-L anesthetic tank, with aeration. Fishes were kept in these individual anesthetic tanks until they reached stage IV of

the anaesthesia, characterized by no reaction to visual or mechanical stimulation and total loss of balance and muscular tonus (Summerfelt, Smith, 1990). The time spent to reach this stage was registered. All fish were weighed (g), measured (cm), and injected with intramuscular PIT-tags, between dorsal fin and lateral line, for further identification. Among these fishes, by sorting, 20 made up the control treatment (CO), in which fish were only anesthetized and measured; 20 made up sham-surgery treatment (SS), in which fish were anesthetized, measured and passed through surgery and suture without tagging; and 20 made up the true-surgery treatment (TS), which fish passed through the same proceedings of SS and also underwent transmitter insertion into the coelomic cavity. Such procedures were performed between August 16 and 18, 2016.

### **2.3 Surgery**

Fish sorted for treatments SS and TS were removed from the 30-L anesthetic tanks with nets and placed on a cushioned foam where their gills were continuously irrigated with a solution of Eugenol (0,035ml/L) or pure water, if necessary, by a plastic tube connected to a bucket. For fish in the TS treatment, a inactive (empty-battery) transmitter (Lotek model MCFT-3EM; 8.9-g weight in air, 11-mm width and 49-mm in length) was inserted through a left lateral incision of approximately 5 cm long, made 3 to 5 scales behind the pelvic fin. The antenna was guided with a catheter through the musculature and exited the skin and scales 2-3 cm after the end of the incision. Incisions were sutured with square knots (three throws in each knot), using 4-5 interrupted sutures approximately 1 cm apart of each other. The fish in the SS treatment were submitted to the same procedure of incision and suture, but without inserting the tag. Disposable gloves, blades, sutures of monofilament nylon (diameter of 0.2 mm), and curved needles of 20 mm was used. Non-disposable surgical-materials and transmitters were washed with filtered water and mild detergent and stored in a 70° GL ethanol bath for approximately 30 min before each use, a sterilization procedure similar to those used in other field studies in Brazil (Lopes *et al.*, 2016).

After tagging proceedings, fish from all treatments were kept together, by treatment type, in 2000-L tanks for at least 24 h recovery period. Then, in august 19th, 2016, all fishes were transferred into a 200 m<sup>2</sup> pond and fed daily with commercial feed (36% crude protein). The pond was monitored for dead fish or any abnormal behavior.

### **2.4 Periodic survey**

Following the tagging, periodic surveys were conducted after 7 days (S1), 43 days (S2), 65 days (S3), and 84 days (S4). The first survey happened earlier because this is a critical period for healing assessment (Lopes *et al.*, 2016). During the surveys, all fish were removed from the ponds with seines nets and taken to the laboratory tanks where they were individually anesthetized with Eugenol (0,050ml/L), identified by PIT-Tag number, measured, weighed, and checked for tag expulsion. On May 5, 2017, 259 days after the beginning of the experiment, the final survey (S5) was performed. The fish were removed from the 200 m<sup>2</sup> pond and euthanized with Eugenol (0.1 ml/L). All fish were weighed and autopsied for sex determination, observation of tag expulsion, and presence of internal infections or any other abnormalities. Water temperature of tanks were monitored throughout the experiment at 9:00 a.m. each day.

### **2.5 Assessment of reproduction capacity**

As of October 2016, fish were observed weekly for assessment of ideal gonadal maturation conditions in order to receive hormonal induction, the usual practice for migratory fish reproduction in EAVG. In females that showed abdomen bulged and soft when touched, and reddish urogenital papilla, it was performed a cannulation for verifying the presence of light green eggs. Males were massaged in abdomen, from head to urogenital papilla sense, in order to verify semen extrusion. At November 18, 23 and 30 in 2016, males and females of all treatments that showed the required condition for reproduction were taken to the laboratory, weighed, and identified by the PIT-Tag number. Then, females and males received the first dose of 0.5 mg of hypophysis/kg of body weight. About 10-12 h after the first dose, males and females received a second dose of 5.0 mg of hypophysis/kg. After completing hormonal induction, 2 males and 1 female were joined in 2000-L tanks for natural spawning. At this stage, other males from EAVG not used in the experiment were also taken to the reproduction tanks. These 2000-L tanks had water entrance (from the same source of 200 m<sup>2</sup> pond) and exit at the top, keeping full time water renovation and circulation, with a screen at water exit to avoid egg losses. After spawning, all eggs were recovered with appropriated nets in a beaker, and a sample of 10 ml was taken. Three repeated counts of this sample were performed, for estimation of the average number of eggs by ml. Fecundity by female was estimated by multiplying the total volume off recovered eggs, measured in the beaker, by the average number of eggs counted by ml. After removed the 10 ml samples, eggs were transferred to the egg incubators. About 8-9 h after fertilization, three samples of 260 eggs were collected from egg incubators and transferred to a Bogorov plate; here, fertilized and non-fertilized eggs

were counted. The fertilization rate was calculated by multiplying the average fertilized eggs of the three counts by 100 and dividing this value by 260.

## 2.6 Data analysis

Mortality in relation to treatment, sex and weight, and effect of the anesthetic and surgery time in mortality were assessed by a generalized linear model (GLM), considering binomial distribution (linkfunction = logit). Effects of treatments on fecundity were assessed by a GLM using Gamma distribution (linkfunction = inverse). Given the widely known effects of weight on fecundity (Vazzoler, 1996), number of oocytes per gram of fish was used as a response variable. The weight of transmitters was subtracted from the total weight for fishes of treatment TS. Fertility was assessed in relation to treatment by GLM using values between 0 – 1 and binomial distributions (linkfunction = logit). Overdispersion was calculated by the ratio between residual deviance and degrees of freedom. Variables contributing to the final model were chosen by likelihood ratio test (LRT) (function drop1), using test F for Gamma and Chi test for binomial distribution. Non-significant variables were excluded from the model.

Since the weight of each fish was measured six times (tagging and S1 – S5), it is expected to have repeated design measures, which lead to a mixed model analysis. In this model, logarithmic weight was used as a response variable, and treatment, sex and event of measurement as a predictor variable with fixed effect, and the individual as a random effect variable. The model was fitted considering the restricted maximum likelihood (REML) criterion, using the function lmer. Afterwards, Wald Test type II was performed for p-values. Non-significant variables were excluded from the final model for better fit of the model. Only fish that remained alive until the end of the experiment were analyzed. The residual distributions of all models were graphically analyzed and all analysis were performed in the software R Studio (R Core Team, 2019).

## 3. RESULTS

Water temperature ranged from 20°C in August 2016 to 29°C in February 2017 ( $\bar{X} = 24.7 \pm 1.9^\circ\text{C}$ ). One TS fish disappeared and was not considered in the analysis. Weight of all fish ranged from 475 to 1290g, and tag weight in air as a percent of fish tagged weight ranged from 0.69 – 1.65%.

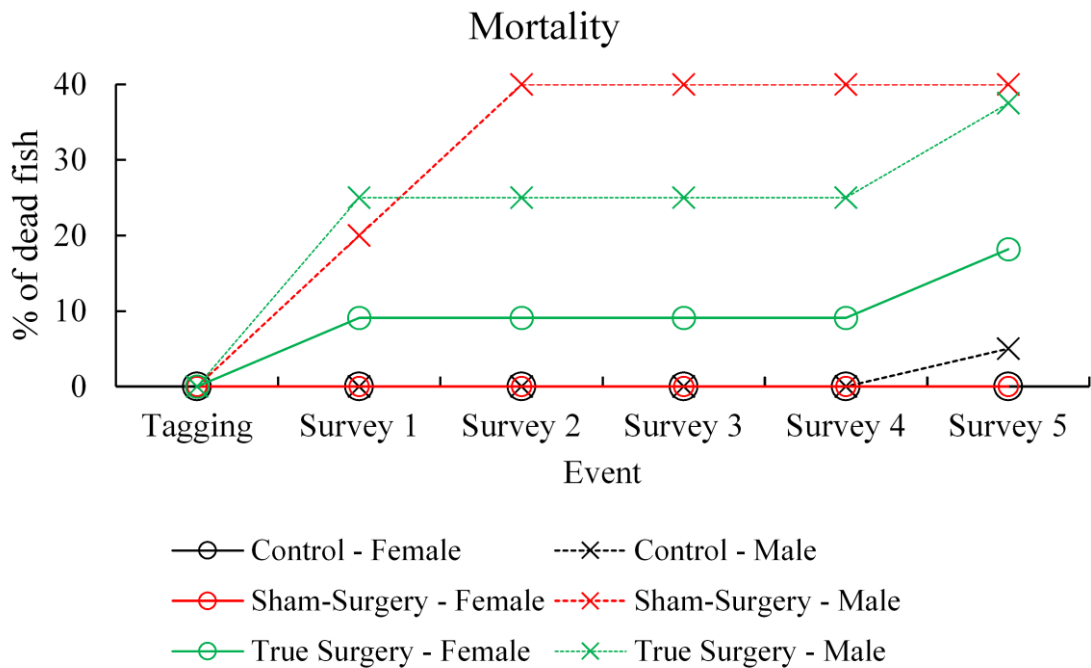
### 3.1 Mortality and tag expulsion

One fish from CO died (5%) six months after the experiment began. Four fish from SS died (20%), three of them within 8 days after surgery. Five TS fish died (25%), three of them within 6 days after tagging. For SS, 40% of the males, but no females, died while 37.5% and 18% of the TS males and females died, respectively. All SS fishes without sex determination died (Tab. 1); these were fish found in the 200 m<sup>2</sup> pond within a few days of death but could not have their sex identified due to decomposition. One tag expulsion was detected in S3 and another three in S5, and these tag expulsion started 3 months after surgery. All fish that expelled the tags (two females and two males) remained alive in the tanks until S5, and in none of them were found with any problems regarding post-surgery healing or infections.

**Tab. 1.** Total number of fish (N), number of dead fishes (Deaths), number of days after surgery each death occurred (Days), and average weight (g), by treatment and sex.

Sex	Control				Sham-Surgery				True Surgery			
	N	Deaths	Days	Weight	N	Deaths	Days	Weight	N	Deaths	Days	Weight
<b>Males</b>	12	1	228	665.4	5	2	4, 8	748.3	8	3	4, 5, 228	800
<b>Females</b>	8	0	-	696.9	13	0	-	850.4	11	2	6, 167	902
<b>ND</b>	0	0	-	-	2	2	4, 38	527.5	0	0	-	-
<b>Total</b>	20	1	-	678	20	5	-	831.2	19	5	-	863.7

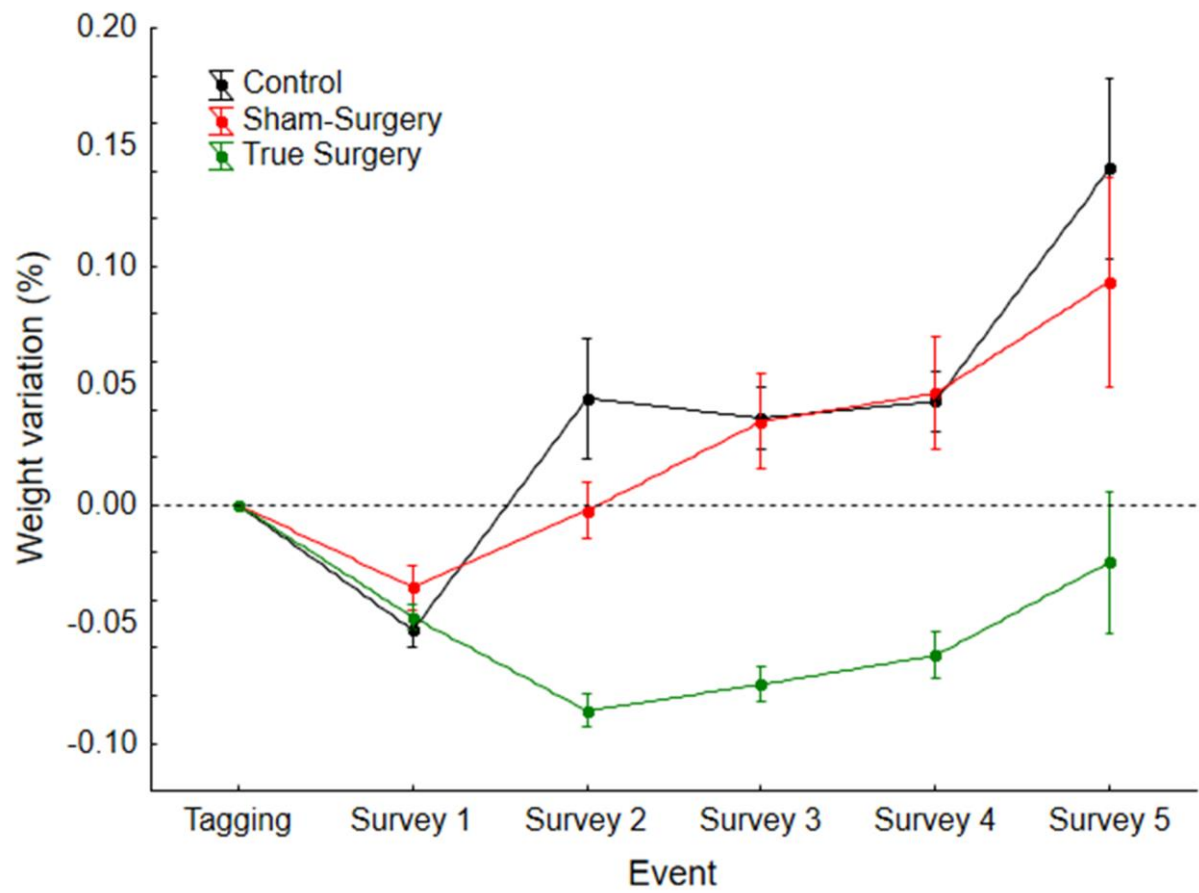
The weight was not a significant predictor for mortality and was excluded from the model (AIC:45.31; Dispersal ratio:0.7). Fish of TS showed higher mortality than CO (Standard error=1.2; z=-1.97; P=0.048), but the same did not occur for fish of SS (Standard error=1.33; z=-1.13; P=0.26). The mortality was also higher between males (Standard Error=0.92; z=-2.09; P=0.04) (Fig. 1). The anesthesia time ranged from 2:41 min to 9:50 min ( $\bar{X} = 4:59 \pm 2:10$  min), surgery time ranged from 5:37 min to 13:12 min ( $\bar{X} = 8:42 \pm 1:39$  min), and there were no differences in anesthesia (AIC: 57.6; Dispersal ratio: 0.09, P=0.47) or surgery time (AIC: 46.5; Dispersal ratio: 1.1; P= 0.73) among fish that died or remained alive.



**Fig. 1.** Mortality by event, treatment, and sex. Tagging occurred in 11/16-18/2016, survey 1 in 08/24/2016, survey 2 in 09/28/2016), survey 3 in 10/21/2016, survey 4 in 11/09/2016, and Survey 5 in 05/03/2017. Reproduction occurred between Survey 4 and Survey 5. We excluded fishes with unidentified sex from the figure.

### 3.2 Weight variation

The difference in weight between treatments was not significant (Standard error-SS: 0.04; t-SS: 2.64; SE-TS: 0.04; t-TS: 2.56;  $P = 0.051$ ) but the difference in weight between surveys was (SE:  $<0.01$ ; t: 7.07;  $P < 0.01$ ). The interaction between the two variables was also significant (SE: 0.002; t: -1.26;  $P < 0.01$ ), indicating different weight variations across surveys among treatments. As a variable, sex did not have a significant effect and was excluded from the final model (REML: -994.7; Variance of random effect: 0.01; Residual variance of random effect:  $< 0.1$ ; SD of random effect: 0.1; Residual SD of random effect: 0.03) (Fig. 2).



**Fig. 2.** Percentage weight variation of fish that remained alive in the pond until the end of the experiment. Tagging occurred in 11/16-18/2016, survey 1 in 08/24/2016, survey 2 in 09/28/2016), survey 3 in 10/21/2016, survey 4 in 11/09/2016, and Survey 5 in 05/03/2017. Reproduction occurred between Survey 4 and Survey 5.

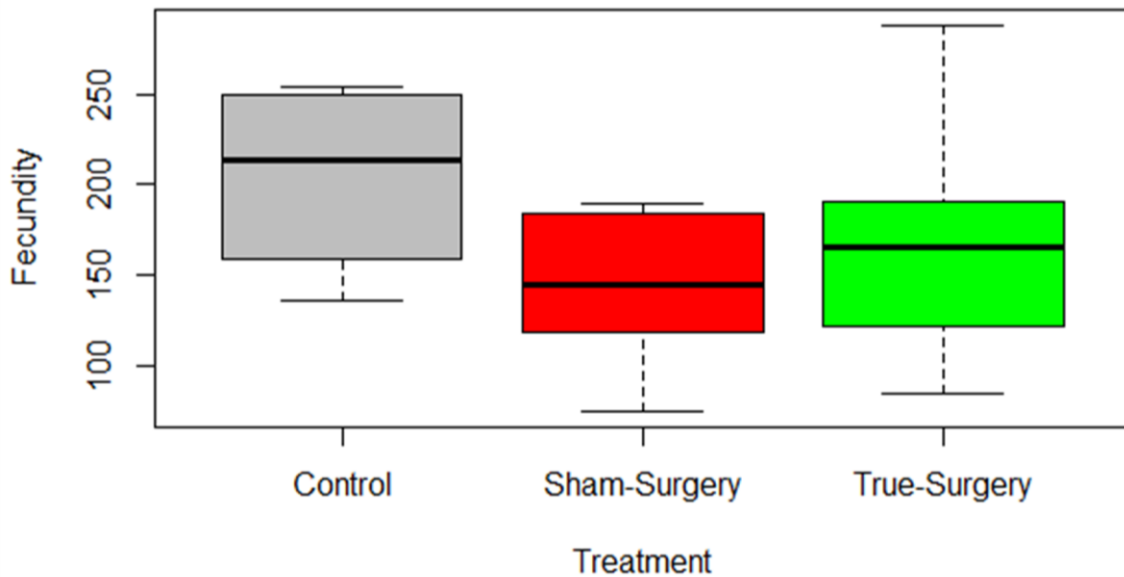
### 3.3 Reproductive capacity

Considering all treatments, 17 females were hormonal-induced for gonadal maturation (Tab. 2). One TS female did not prepare the gonads and did not spawn. When compared with females of CO, we observed a reduction in the median fecundity (Fig. 3), but this difference was not significant for SS (Standard error: <math><0.01</math>;  $t: 1.6</math>;  $P: 0.13</math>) nor for TS (Standard error:<math><0.01</math>;  $t: 0.78</math>;  $P: 0.45</math>) (Final Model - AIC: 179.8; Dispersion ratio:0.12). The fertility was not different among treatments for SS (SE: 1.53;  $t: 0.56</math>;  $P: 0.58</math>) nor for TS (SE: 1.42;  $t:-0.43</math>;  $P: 0.66</math>) compared with treatment CO (Final Model - AIC: 19.6; Dispersion ratio: 0.21;  $R^2: 0.31</math>).$$$$$$$$$



**Tab. 2.** Fecundity and fertility values for female of *Prochilodus lineatus* subjected to induced reproduction with natural spawning.

<b>Reproductive capacity</b>	<b>Control</b>	<b>Sham-Surgery</b>	<b>True-Surgery</b>
N-Females	4	7	6
Mean oocytes number	172,300	137,029	155,920
Standard deviation	±77,76	±59,89	±74,99
Fertility	71%	85%	57%
Standard deviation	±21	±10	±30



**Fig. 3.** Fecundity (oocytes by gram of body weight) compared among treatments.

#### 4. DISCUSSION

Our results point out that surgery and/or tagging cause significant losses due to death and tag expulsion as well as higher mortality between males, although the experiment was not completely conclusive about the differences between sexes. Fishes from all treatments showed weight loss in the first week after experiment, followed by a gain, but recovering weight patterns were not the same among treatments. The capacity of spawning, the fecundity, and the fertility were not altered by handling, surgery, and/or tagging.

##### 4.1 Mortality and tag expulsion

Considering the total of 10 deaths in all treatments, 60% occurred less than 10 days after surgery, all of these were individuals of the surgery treatments (SS and TS). The number

of deaths were very similar between the two treatments that includes surgery (SS and TS), especially if considering those which occurred within a few days after surgery. This indicates that these deaths occurred due to surgery and not the tags. Lopes *et al.* (2016), studying intracoelomic radiotagging effects in *P. lineatus*, but for 30 days, found less mortality (1.5%), although 15% of fish had internal infections by the end of the experiment, meaning that many of those fish could have potentially died or expelled the tags if the experiment had continued any longer. One difference between the two studies is the position of the incision: we performed lateral incisions and Lopes *et al.* (2016) did ventral incisions. In addition, studies have pointed that trailing antennas exiting body wall, as used in this study, could increase mortality in relation to antenna coiled within body cavity (Collins *et al.*, 2002; Isely *et al.*, 2002). However, detectability should be considered, since internal antenna attenuate signal (Cooke, Bunt, 2001). Therefore, we strongly recommend further studies to analyze effects of incision location and antenna placement in Neotropical fishes.

Usually, mortality after surgery in fish species from colder waters is lower than in tropical ones (Baras *et al.*, 2000; Close *et al.*, 2003; Smircich, Kelly, 2014). Okland *et al.* (2003) observed 100% mortality when tagging common carp in a Namibian reservoir, when temperatures ranged between 24 and 25°C, and proposed that higher temperatures could increase mortality rates. Higher temperatures favor microbial outbreaks (Baras *et al.*, 2000) which can increase infection and mortality rates. So, the use of antibiotics may be considered to reduce infections immediately after surgery (Isely *et al.*, 2002). For example, the antibiotic oxytetracycline have been successful in prevent post-surgical infections in fish living at warm waters (Hanzen *et al.*, 2020), and should be considered in surgical protocols for tagging Neotropical fishes. Once handling protocol was the same for all treatments, we assume no additional effects of these factors in mortality difference among treatments. Further studies should investigate if the combination of handling and surgery could harm or delay the healing and increase mortality.

Only mortality of TS fishes was significantly greater than CO, which indicates that a combination between surgery and tagging increased mortality. The negative consequences of tagging are widely known (Close *et al.*, 2003; Jadot *et al.*, 2005; Hahn *et al.*, 2011), but differ among species (Jepsen, 2004). For example, predatory fish generally have larger body cavities and more flexible bodies than omnivorous or planktivorous species (Jepsen *et al.*, 2002), which could help to fit the tag. Additionally, while Siluriform fishes have dorsally flattened bodies and larger celomatic cavities (some exceptions must be observed, such as *Pinirampus pirinampu* (Spix & Agassiz 1829), a more elongated Siluriform), *Prochilodus* spp. are

detritivorous fishes with laterally flattened bodies and less flexible body walls, which could explain their greater tag losses and mortality among wild Neotropical fishes.

While average tag losses in Neotropical biotelemetry studies amount to 4.6% for Siluriforms and/or carnivores fishes (Godinho *et al.*, 2006; Hahn *et al.*, 2011; Silva, 2012), it has been estimated as high as 17% for *Prochilodus* species (Godinho, Kynard, 2006; Pesa, Schulz, 2010; Silva, 2012; Lopes *et al.*, 2018a). The same driver could explain observed differences between sexes since less flexible body walls are expected in males, presenting lower variation in gonad volume along the maturation cycle compared to females (Vazzoler, 1996). When considering the two treatments that included surgery, 8% of females and 38% of the males died.

#### **4.2 Weight variation**

We verified that fishes from all treatments lost weight in the first week after the experiment. From S1 to S2, CO and SS fishes started to recover and kept increasing weight until the final of the experiment. Baras *et al.* (2000) also reported that fishes lost weight some days after handling and surgery, but compensated these losses with compensatory growth. Not only surgery and tagging, but also handling, could lead to stress in fishes (Jepsen *et al.*, 2001; Almeida *et al.*, 2018) which can reduce feeding activity during the days after the experiment proceedings.

However, TS fishes started recovering weight only after S2 and did not reach the same weight from CO and SS fishes until the final survey. According to Jepsen *et al.* (2001), growth is indicator of fish well-being and stress due to handling and tagging is the cause of such lower growth. Baras *et al.* (2000) also reported clear differences between the growth of perch with tag ratios in the water above and below 1.25%, so it is possible that higher tag burdens can lead to impacts in growth. It is also possible that *Prochilodus* species have worse tag “fits” in relation to carnivorous and/or Siluriform species due to body shape which can lead to difficulties in feeding. For example, Mitamura *et al.* (2006) reported that weight gains of the tagged *Pangasianodon gigas* Chevey 1931 did not differ from control fishes. In this way, we suggest that when and if possible, smaller tags should be considered for *Prochilodus* species. Since stress levels are highest in the hours or days after tagging (Jepsen *et al.*, 2001; Close *et al.*, 2003), we suggest the use of analgesics like morphine prior to the release of tagged fishes. Although pain in fishes is a question under discussion (Rose *et al.*, 2014), the use of analgesic could improve recovery and stress after invasive procedures (Sneddon, 2012).

### 4.3 Reproductive capacity

Fecundity, fertility and spawning were not affected by surgery and presence of tags. In opposition, Berejikian *et al.* (2007) reported higher mortality and egg retention and mortality in intracoelomic tagged females of Chinook Salmon *Oncorhynchus tshawytscha* Walbaum 1792 after spawning, arguing that water intrusion and loss of ovarian fluid caused this effect. An important difference in this study is the time of tagging: those female Chinook Salmon were tagged very close to spawning (60% of females were ovulated when tagged). In our study, tagging took place 3 months before spawning, when gonads were still in the resting stage. In this case, gonads are smaller and likelihood of damage during surgery from tagging is probably lower. For example, Close *et al.* (2003) and Baras *et al.* (2000) also verified that Pacific Lamprey *Lampetra tridentata* (Richardson 1836) and European Perch *Perca fluviatilis* Linnaeus 1758 were able to mature the gonads without problems within four and six months, respectively, after tagging. So, we suggest that it may be not suitable to proceed laparotomy tagging at mature fishes, a common procedure in biotelemetry studies with Neotropical fishes. Berejikian *et al.* (2007) recommends the use of subdermal tagging to reduce negative effects in spawning in these cases.

An essential assumption in biotelemetry is that the tagged sample is representative of the population, so it is desirable that the presence of the tag does not alter the performance, physiology or survival of tagged fish (Smircich, Kelly, 2014). Despite of the use of hormonal induction for final gonad maturation – a necessary procedure to reproduce Neotropical migratory fishes in captivity, the spawning was natural. Therefore, we assume that in a natural condition, the tagged females would not have the reproductive behavior altered by tagging or handling procedures.

According to our results, within the nine months' time scale, almost half of the tagged fish would not return information in a field study due to mortality and tag expulsion. These tag losses should be considered when defining sample number of future studies. We identified that reproduction capacity, represented in this study by occurrence of spawning, fecundity and fertility, were not significantly altered by tagging procedures and suggest that, after healing from surgery, tagged fish are able to show natural reproduction behavior in nature. Improvements in tagging procedures, especially in surgery and transmitter manufacturing, must be encouraged to reduce loss of information due to death and tag expulsion. Although our study was conducted in non-natural conditions, it represents the first results regarding the effects of tagging in Neotropical fish reproduction. Additionally, our results indicate that

intracoelomically tagged fish could provide reliable information about migration and reproduction behavior. Since tagging and surgery techniques generally are the same for a wide range of species, we consider it plausible to infer that the same effects observed in this study could occur with other species and tags types. Finally, we strongly encourage future investigation about differential mortality between males and females, as well as any other factors that could lead reduce mortality and tag expulsion, such as antibiotics and antenna configuration.

### **ACKNOWLEDGEMENTS**

We are thankful to the staff of the Estação Ambiental de Volta Grande (EAVG) for cooperation in all steps of the experiment. Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) and Peixe Vivo Program provided administrative and financial support for this experiment (CEMIG/Aneel Research and Development Program 455). We also thank Dr. Gustavo Heringer for help in statistical analysis. PSP was supported by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; PQ- 303548/2017-7), and AP was granted a PhD scholarship by Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

### **REFERENCES**

- Agostinho AA, Gomes LC, Suzuki HI, Julio-Jr HF. Migratory fish from the upper Paraná River basin, Brazil. In Carolsfeld J, Harvey B, Ross C, Baer A, editors. Migratory fishes of South America: Biology, social importance and conservation status. Victoria, BC: World Fisheries Trust; 2003. p. 19-98.
- Almeida DM, Petesse ML, Tachibana L, Danielle de Carla DIAS, Moreira RG, Ranzani-Paiva MJT. Monitoring whole blood, plasma and serum variables of Nile tilapia during 24 hours, after capture stress. Bol Inst Pesca. 2018; 44:1041-45. <http://dx.doi.org/10.20950/1678-2305.2018.44.4.369>
- Baras E, Malbrouck C, Houbart M, Kestemont P, Melard C. The effect of PIT tags on growth and some physiological factors of age-0 cultured Eurasian perch *Perca fluviatilis* of variable size. Aquaculture. 2000; 185:159–73. [http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00346-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00346-4)
- Berejikian BA, Brown RS, Tataru CP, Cooke SJ. Effects of telemetry transmitter placement on egg retention of naturally spawning captive reared steelhead. N Am J Fish Manage. 2007; 27:659–64. <http://dx.doi.org/10.1577/M06-142.1>

- Birnie-Gauvin K, Franklin P, Wilkes M, Aarestrup K. Moving beyond fitting fish into equations: Progressing the fish passage debate in the Anthropocene. *Aquat. Conserv.: Mar. Freshwat. Ecosyst.* 2019; 29:1095-1105. doi: 10.1002/aqc.2946
- Bowen SH. Detritivory in neotropical fish communities. *Environ Biol Fishes.* 1983; 9:137-44. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00690858>
- Brown RS, Carlson TJ, Welch AE, Stephenson JR, Abernethy CS, Ebberts BD, Langeslay MJ, Ahmann ML, Feil DH, Skalksi JR, Townsend RL. Assessment of barotrauma from rapid decompression of depth-acclimated juvenile Chinook salmon bearing radiotelemetry transmitters. *Trans Am Fish Soc.* 2009; 138:1285–1301. <http://dx.doi.org/10.2172/914683>
- Brown RS, Cooke SJ, Wagner GN, Eppard MB. Methods for surgical implantation of acoustic transmitters in juvenile salmonids: a review of literature and guidelines for techniques. Portland: U.S. Army Corps of Engineers; 2010.
- Close DA, Fitzpatrick MS, Lorion CM, Li HW, Schreck CB. Effects of intraperitoneally implanted radio transmitters on the swimming performance and physiology of Pacific lamprey. *N Am J Fish Manage.* 2003; 23:1184–92. <http://dx.doi.org/10.1577/MO2-057>
- Collins MR, Cooke DW, Smith TIJ, Post WC, Russ DC, Walling DC. Evaluation of four methods of transmitter attachment on shortnose sturgeon, *Acipenser brevirostrum*. *J Appl Ichthyol.* 2002; 18:491–494. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0426.2002.00386.x>
- Cooke S, Midwood J, Thiem J, Klimley P, Lucas M, Thorstad E, Eiler J, Holbrook C, Ebner B. Tracking animals in freshwater with electronic tags: past, present and future. *Anim Biotelem.* 2013; 1:5. <http://dx.doi.org/10.1186/2050-3385-1-5>
- Cooke SJ, Woodley CM, Eppard MB, Brown RS, Nielsen JL. Advancing the surgical implantation of electronic tags in fish: a gap analysis and research agenda based on a review of trends in intracoelomic tagging effects studies. *Rev Fish Biol Fish.* 2011; 21:127-51. <http://dx.doi.org/10.1007/s11160-010-9193-3>
- Cooke SJ, Bunt CM. Assessment of internal and external antenna configurations of radio transmitters implanted in smallmouth bass. *N Am J Fish Manage.* 2001; 21:236–241. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(2001\)021<0236:MBOIAE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(2001)021<0236:MBOIAE>2.0.CO;2)
- Crossin GT, Hinch SG, Cooke SJ, Cooperman MS, Patterson DA, Welch DW, Hanson KC, Olsson I, English KK, Farrell AP. Mechanisms influencing the timing and success of reproductive migration in a capital breeding semelparous fish species, the sockeye salmon. *Physiol Biochem Zool.* 2009; 82:635-52. <http://dx.doi.org/10.1086/605878>
- Espinach-Ros A, Delfino R. Situación de las pesquerías de la Cuenca de la Plata en Paraguay, Bolivia, Argentina e Uruguay. *FAO Informaciones de Pesca.* 1993; 490:36-51.

- Godinho AL, Kynard B. Migration and spawning of radio-tagged zulega *Prochilodus argenteus* in a Dammed Brazilian River. *Trans Am Fish Soc.* 2006; 135:811–24. <http://dx.doi.org/10.1577/T04-176.1>
- Godinho AL, Kynard B, Godinho H. Migration and spawning of female surubim (*Pseudoplatystoma corruscans*, Pimelodidae) in the São Francisco River, Brazil. *Environ Biol Fishes.* 2006; 80:421–33. <http://dx.doi.org/10.1007/s10641-006-9141-1>
- Hahn L, Agostinho AA, English KK, Carosfeld J, Da Camara LF, Cooke SJ. Use of radiotelemetry to track threatened dorados *Salminus brasiliensis* in the upper Uruguay River, Brazil. *Endanger Species Res.* 2011; 15:103-14. <http://dx.doi.org/10.3354/esr00363>
- Hahn L, English K, Carosfeld J, Silva LGM, Latini JD, Agostinho AA, Fernandez DR. Preliminary study on the application of radio-telemetry techniques to evaluate movements of fish in the lateral canal at Itaipu Dam, Brazil. *Neotrop Ichthyol.* 2007; 5:103-8. <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-62252007000200003>
- Hahn L, Nunes LD, Câmara LFM, Abolis DS, Fries LCC, Martins EG, Garrone Neto D. Reporting on the recapture of electronic tagged fish by fishers in the Xingu River, Brazilian Amazon. *Braz J Biol.* 2015; 75:99-101. <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.02214BM>
- Hanzen C, Lucas MC, O'Brien G, Calverley P, Downs CT. Surgical implantation of radio tags in three eel species (*Anguilla* spp.) in South Africa. *J Fish Biol.* 2020; 96:847–852. <https://doi.org/10.1111/jfb.14270>
- Isely JJ, Young SP, Jones TA, Schaffler JJ. Effects of antenna placement and antibiotic treatment on loss of simulated transmitters and mortality in hybrid striped bass. *N. Am. J Fish Manage.* 2002; 22:204–7. [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8675\(2002\)022<0204:EOAPAA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8675(2002)022<0204:EOAPAA>2.0.CO;2)
- Jadot C, Donnay A, Ylief M, Poncin P. Impact implantation of a transmitter on *Sarpa salpa* behaviour: study with a computerized video tracking system. *J Fish Biol.* 2005; 67:589–95. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0022-1112.2005.00761.x>
- Jepsen N, Davis LE, Schreck CB, Siddens B. The physiological response of Chinook salmon smolts to two methods of radio-tagging. *Trans Am Fish Soc.* 2001; 130:495-500. [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659\(2001\)130<0495:TPROCS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659(2001)130<0495:TPROCS>2.0.CO;2)
- Jepsen N, Koed A, Thorstad EB, Baras E. Surgical implantation of telemetry transmitters in fish: how much have we learned? *Hydrobiologia.* 2002; 483:239–48. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1021356302311>
- Jepsen N, Schreck C, Clements S, Thorstad EB. A brief discussion on the 2% tag/body mass rule of thumb. In Spedicato MT, Lembo G, Marmulla G editors. *Aquatic telemetry: advances*

and applications. Proceedings of the fifth conference on fish telemetry held in Europe. Rome: FAO/COISPA; 2004. p. 255-59.

Langeani F, Castro RMC, Oyakawa OT, Shibatta OA, Pavanelli CS, Casatti L. Diversidade da ictiofauna do Alto Rio Paraná: composição atual e perspectivas futuras. *Biota Neotrop.* 2007; 7:181-97. <http://dx.doi.org/10.1590/S1676-06032007000300020>

Lopes JM, Alves CBM, Silva FO, Bedore AG, Pompeu PS. Effect of anesthetic, tag size, and surgeon experience on postsurgical recovering after implantation of electronic tags in a neotropical fish: *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1837) (Characiformes: Prochilodontidae). *Neotrop Ichthyol.* 2016; 14:e150189. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-0224-20150189>

Lopes JM, Alves CBM, Peressin A, Pompeu PS. Influence of rainfall, hydrological fluctuations, and lunar phase on spawning migration timing of the Neotropical fish *Prochilodus costatus*. *Hydrobiologia.* 2018a; 818:145–61. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-018-3601-4>

Lopes JDM, Pompeu PS, Alves CBM, Peressin A, Prado IG, Suzuki FM, Facchin S, Kalapothakis E. The critical importance of an undammed river segment to the reproductive cycle of a migratory Neotropical fish. *Ecol Freshwater Fish.* 2018b; 28:302-16. <http://dx.doi.org/10.1111/eff.12454>

Lopes JDM, Alves CBM, Peressin A, Pompeu PS. Upstream and downstream migration speed of *Prochilodus costatus* (Characiformes: Prochilodontidae) in upper São Francisco basin, Brazil. *Neotrop Ichthyol.* 2019; 17:e180072. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-0224-20180072>

Mitamura H, Mitsunaga Y, Arai N, Viputhanumas T. Comparison of two methods of attaching telemetry transmitters to the Mekong Giant Catfish, *Pangasianodon gigas*. *Zool Sci.* 2006; 23:235:38. <http://dx.doi.org/10.2108/zsj.23.235>

Okland F, Hay CJ, Naesje TF, Nickandor N, Thorsstad EB. Learning from unsuccessful radio tagging of common carp in a Namibian reservoir. *J Fish Biol.* 2003; 62:735–39. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1095-8649.2003.00043.x>

Pesoa NA, Schulz UH. Diel and seasonal movements of grumatã *Prochilodus lineatus* (Valenciennes 1836) (Characiformes: Prochilodontidae) in the Sinos River, Southern Brazil. *Braz J Biol.* 2010; 70:1169-77. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842010000600006>

R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. Retrieved from <https://www.R-project.org/>.



- Rose JD, Arlinghaus R, Cooke SJ, Diggles BK, Sawynok W, Stevens ED, Wynne CD. Can fish really feel pain? *Fish Fish*. 2014; 15:97-133. <http://dx.doi.org/10.1093/icesjms/fsy067>
- Rustadbakken A, L'Abée-Lund JH, Arnekleiv JV, Kraabøl M. Reproductive migration of brown trout in a small Norwegian river studied by telemetry. *J Fish Biol*. 2004; 64:2-15. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8649.2004.00275.x>
- Schreck CB, Contreras-Sanchez WM, Fitzpatrick MS. Effects of stress on fish reproduction, gamete quality, and progeny. *Aquaculture*. 2001; 197:3–24. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-50913-0.50005-9>
- Schulz UH. Effects of surgically implanted dummy transmitters on the South American catfish Jundiá (*Rhamdia quelen*). *Braz J Biol*. 2003; 63:345-48. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842003000200019>
- Silva LGM. Parâmetros migratório e transposição de curimatás e mandis-amarelos no médio rio Grande. In Lopes JM, Silva FO editors, *Transposição de peixes*. Belo Horizonte: Cemig; 2012. p.111-31.
- Smircich MG, Kelly JT. Extending the 2% rule: the effects of heavy internal tags on stress physiology, swimming performance, and growth in brook trout. *Anim Biotelem*. 2014; 2:16. <http://dx.doi.org/10.1186/2050-3385-2-16>
- Sneddon LU. Clinical anesthesia and analgesia in fish. *J Exot Pet Med*. 2012; 21:32–43. <http://dx.doi.org/10.1053/j.jepm.2011.11.009>
- Summerfelt RC, Smith LS. Anesthesia, surgery and related techniques. In Schreck CB, Moyle PB editors. *Methods for fish biology*. Bethesda: American Fisheries Society; 1990. p.213-72.
- Thorstad EB, Kerwath SE, Attwood CG, Økland F, Wilke CG, Cowley PD, Naesje TF. Long-term effects of two sizes of surgically implanted acoustic transmitters on a predatory marine fish species (*Pomatomus saltatrix*). *Mar Freshwater Res*. 2009; 60:183-86. <http://dx.doi.org/10.1071/MF08191>
- Vazzoler AEAM. *Biologia da reprodução de peixes teleósteos: teoria e prática*. Maringá: EDUEM; 1996.
- Wilson AD, Hayden TA, Vandergoot CS, Kraus RT, Dettmers JM, Cooke SJ, Krueger C C. Do intracoelomic telemetry transmitters alter the post-release behaviour of migratory fish? *Ecol Freshwater Fish*. 2016; 26:292-300. <http://dx.doi.org/10.1111/eff.12275>
- Wootton RJ. *Fish ecology*. New York: Chapman and Hall; 1992.

## ARTIGO 2 – DETAILS ON THE PARTIAL MIGRATION OF A NEOTROPICAL FISH

Alexandre Peressin<sup>1,2</sup>, João de Magalhães Lopes<sup>3</sup>, Lídia Wouters<sup>1</sup>, Francisco Ricardo Andrade Neto<sup>1</sup>, Carlos Bernardo Mascarenhas Alves<sup>4</sup>, Paulo Santos Pompeu<sup>1</sup>

1 – Departamento de Ecologia e Conservação, Universidade Federal de Lavras, Campus Universitário, Lavras, MG, Brazil. [alexandre.peressin@gmail.com](mailto:alexandre.peressin@gmail.com).

2 – Centro de Ciências da Natureza, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) - campus Lagoa do Sino.

3 – Saneamento de Goiás – SANEAGO, Av. Antônio Torquato, 735, Ouvidor, GO, Brazil, Zip code 75775-000.

4 - Bio-Ambiental Consultoria em Meio Ambiente Ltda., R. Rio de Janeiro, 1858/902, Lourdes, Belo Horizonte, MG, Brazil, Zip code 30160-042.

### Acknowledgements and funding information

The authors are very grateful to several land owners of the region that allowed fishing and permanent monitoring of fixed stations, specially to Sr. José Antônio de Vasconcelos (*in memoriam*). Authors are also thankful to Marina Ferreira Moreira for figure 1, to Gustavo Heringer for help in statistical analysis, and to João Bosco dos Santos, José Concesso dos Santos, and Cloves Martins Gonçalves for fisheries. This study received financial support from Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG n° 11548/2018, PhD scholarship from first author), from Companhia Energética de Minas Gerais (P&D CEMIG/ANEEL GT 612), and from Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq N° 303548/2017-7, Paulo Santos Pompeu scholarship).

### Data availability statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

### Ethics approval statement

Manuscript is not published or submitted for publication elsewhere. All proceedings were carried out under capture permission (SISBIO 10327) and approval of ethics committee of the Universidade Federal de Lavras (CEUA UFLA 003/2019).

**ABSTRACT**

Fine details on partial migration is poorly known for Neotropical fishes. Nevertheless, they are the most important species for fisheries and also the most endangered by damming and overfishing. Here, it was evaluated the migratory behavior of *Prochilodus argenteus* in a free flowing lotic-remanent (~450km) using radiotracker tagging and eggs sampling. Among the detectable and active fish, 50% migrated from 100-365 km upstream the tagging site, mainly after first increase in river flow at beginning of wet season. The remaining did not perform upstream movements. Body weight, length, and condition factor were not related with migration decision. Eggs distribution indicates that just fish at upstream sites were able to breed. The observed migratory traits are very similar to the sympatric *P. costatus*, meaning that migratory pattern of Neotropical species is broader than previously recognized. In this context similar management measures could be useful for conservation of both species.

**Keywords:** *Prochilodus argenteus*, curimatá-pacu, São Francisco river, flow, migration triggers, condition factor,

## 1. INTRODUCTION

Migratory fishes are often the most important species for fisheries across the world (Camargo and Petrere Jr, 2001; Carolsfeld *et al.*, 2003; Duponchelle *et al.*, 2021; Godinho *et al.*, 2003), besides playing important ecological roles (Flecker, 1996; Duponchelle *et al.*, 2021). These species are also among the most threatened, mainly due to the damming of rivers observed all over the world (Esguicero and Arcifa, 2010; Gehrke *et al.*, 2002; Nilsson *et al.*, 2005). However, despite of conservation efforts, recent evidence suggest that most common mitigation measures do not maintain migratory fish populations in the long term (Birnie Gauvin *et al.*, 2017; Dugan *et al.*, 2010; O'Brien *et al.*, 2019; Reid *et al.*, 2018). One of the reasons to this failure is lack of knowledge, once current studies have suggested that fine scale details about migratory behavior could also have great consequences for migratory fish conservation (Lopes *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2019). Even basic details are not known for many neotropical migratory fish species, and, although Agostinho *et al.* (2003) already reported partial migration, nothing is known about this behaviour in neotropical fishes.

Information about the migration pattern of neotropical fish species, when available at fine-scale, are usually restricted to dammed or short free flowing stretches under the influence of flow regulation promoted by the dam's operation procedures (Hahn *et al.*, 2011; Godinho and Kynard, 2006; Fries, 2019; Silva, 2012), which limits knowledge about natural behavior. These radiotelemetry studies provide useful information but allow for limited management conclusions since they are performed at heavily modified environments. Furthermore, the association of these data with sampling of hatch sites (eggs and larvae), also essential for confirm the purpose of the migration, is even rarer. Additionally, partial migration behavior is recognized but there is no further information. For example, Agostinho *et al.* (2003) reports large schools remaining stationary along reproductive season, but there is no conclusive information if these stationary fish also breed. Lopes *et al.* (2018) also reports variation in the fraction of *Prochilodus costatus* migrating every year, but individual factors playing a role in the decision to migrates where not identified.

Another recognized long-distance migratory fish endemic of São Francisco river is *Prochilodus argenteus*, popularly known as Curimatá-Pacu or Zulega (Sato and Godinho, 2003). This species is the biggest species of Prochilodontidae family, reaching up to 15 kg in body weight (Sato *et al.*, 2003), and representing more than 50% of fish yield in some stretches of the São Francisco river (Sato *et al.*, 1996). Generally, fishes of the genus *Prochilodus* can reach enormous populations (Carolsfeld *et al.*, 2003), even representing more

than half of total biomass in some basins (Bowen, 1983). Consequently, species of this genus are usually the most important for professional and artisanal fisheries in South America (Camargo and Petrere, 2001; Garcia *et al.*, 2009; Godinho *et al.*, 2003; Sato *et al.*, 1996; Welcomme, 1990), but in recent decades, yields have declined (Agostinho *et al.*, 2007; Duque *et al.*, 1998, Godinho and Godinho, 2003). Generally known as Sabalo in Spanish and curimatá in Portuguese (Resende, 2003), they are responsible for nutrient cycling, and considered ecosystem engineers (Flecker, 1996), so their removal can result in severe impact for river ecosystems (Taylor *et al.*, 2006). Due to ecological and importance at fisheries, studies on Neotropical fish migration have focused on prochilodontids as a study model in several rivers such as the São Francisco (Lopes *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2019; Godinho and Kynard, 2006), Paraná (Celestino *et al.*, 2018; Ros *et al.*, 1998), Orinoco (Duque *et al.*, 1998), and Amazon (Silva and Stewart, 2017).

A broader knowledge about migratory pattern of different species, identifying shared behaviors, could be very useful for more effective conservation planning, as well as refining knowledge about complex and instigating behaviors as partial migration. So, the aim of this study is to describe fine scale information about natural migratory behavior of the Curimatá-Pacú *Prochilodus argenteus* Spix & Agassiz 1829. More specifically, the study aims to answer the following questions: I. When do they begin migration, when do they finish, and what is the outcome of migration? II. What are the triggers for migration onset? III. What is the proportion of fish that migrate, and is this fraction influenced by condition factor or weight? IV. Where are located the spawning sites? V. Do fish that migrate upstream perform downstream return?

## 2. METHODOLOGY

### 2.1 Study sites

The study was carried out in the upper stretch of the high São Francisco river basin, a lotic remnant in which the river flows unimpeded for approximately 450 km. This free-flowing stretch runs from the historic (São Francisco river) and geographic (Samburá river) headwaters of São Francisco river, beginning in the Canastra mountains, to the Três Marias reservoir (Silva *et al.*, 2003). The stretch drains an area of 14,203 km<sup>2</sup> and important tributaries include the Bambuí and Pará rivers (Figure 1). The Três Marias dam (18°12'49"S, 45°15'42"W) is the first hydroelectric power plant in the main channel of São Francisco river and generates 396 MW (Cemig, 2006). The dam is 75 m high and was built in 1962 to

improve flow regulation and hydroelectric generation, forming a reservoir of 1,090 km<sup>2</sup> (Cemig, 2006). The tagging site, located in the Pará river 16 km upstream from the river mouth of the São Francisco river, is a known feeding site for another *Prochilodus* species (Lopes et al. 2019a). The climate in the region is humid tropical, with a rainy season extending from October to March, and an average annual rainfall of 1200 – 1500 mm (CODEVASF, 1991).

### 2.3 Environmental variables

River discharge and rainfall data were obtained from a gauging station “Porto das Andorinhas” of Cemig (the Minas Gerais state power company) on the São Francisco river, located approximately 26.3 km upstream of the mouth of Pará river, the closest of tagging site with complete data series. Data encompasses the period from July 2019 to July 2020, downloaded at Agência Nacional de Águas (ANA) WebSite (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>).

### 2.4 Capture and tagging

Based on previous studies by Lopes *et al.* (2018; 2019), *P. costatus* starts migration at the end of September in the study region. So, individuals of *P. argenteus* were captured in the Pará river from 4-22 September 2019, always at night and with cast nets, to reduce stress and physical injuries (Bido *et al.*, 2018). After capture, all fish were carried to cages installed in the river. The next morning, fish were carried one at a time to the surgery station using an appropriate hand net. Once at surgery station, fish were placed in the 30-L anesthetic tank with Eugenol solution (0.05 mg.L<sup>-1</sup>), where they remained until reach stage IV of anesthesia (Summerfelt and Smith, 1990).

After fish were anesthetized, they were measured (cm), weighed (g), and placed in a cushioned foam covered by a disposable paper towel. Gills were irrigated using a hose that could bring river water or eugenol solution (0.035 mg.L<sup>-1</sup>) to maintain breathing frequency. A lateral incision of approximately 5 cm was made 4 or 5 scales above the pelvic fin. A Lotek Wireless Inc. motion-sensing radio transmitter (MCFT2–3EM–M, 10g in air) was inserted in the coelomic cavity by the incision and antenna was placed on the lateral body wall using a trocar and exiting near to the caudal peduncle above the anus. The incision was closed with nylon sutures (0.200–0.249 mm), using four to five stitches for each fish. Only fish weighing 500g or more were tagged in order to not exceed 2% relationship between tag weight and

body weight (Winter, 1996). All radiotransmitters were tested for signal detection before surgical implantation.

Surgeries were always conducted by an expert surgeon using disposable gloves and the sterile procedures for surgical instruments followed the protocol outlined by Lopes *et al.* (2016). At the end of the surgery, Terramicina was administered in each fish (1 ml.kg<sup>-1</sup>), also using disposable needles and syringes. Then, fish were carried again to another cage net at river, for recovery from Anesthesia and surgery stress, when they remained at least 1 hour before being releasing at Pará river (19°S 16'49.50"S; 45°W 4'42.40"O).

## **2.5 Radiotelemetry monitoring**

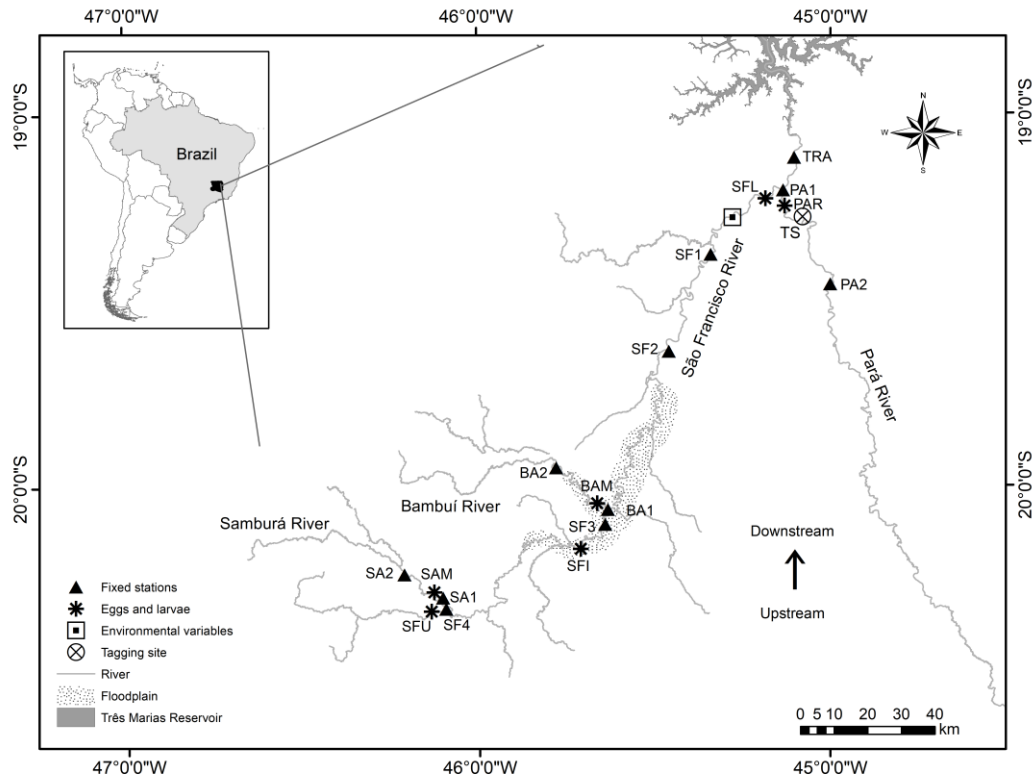
Eleven fixed stations were deployed across the study area to monitor tagged fish. They included the upper region of Três Marias reservoir (TRA), the São Francisco river main channel (SF1, 2, 3, and 4), and the tributaries Pará (PAR 1 and 2), Bambuí (BAM 1 and 2), and Samburá (SAM 1 and 2), covering approximately 530 linear kilometers of river channels (Figure 1). The first fixed station in each tributary was positioned as close as possible to its confluence with the São Francisco river. Stations comprised two antennas with five elements, one directed upstream and another downstream, both installed on poles at a height between 5 and 7 meters deployed on the river bank. The antennas were connected to a Lotek SRX-DL receiver, whose energy source was a battery powered by a solar plate.

Five tracks by boat were conducted in November 2019, August 2020 and February/September/December 2021, covering the stretch of Pará river located among fixed station PAR2 and PAR1, a 50 km river stretch which includes the tagging site. These tracks by boat were performed aiming to identify fishes that do not passed any fixed stations but remained active and detectable. Fishes were detected with a three elements antenna connected to a Lotek SRX-600 receiver and positions were recorded by integrated GPS.

## **2.6 Eggs and larvae sampling**

Eggs and larvae were sampled at six points distributed along the study area, three in the main channel of São Francisco river (superior, intermediate, and inferior), and one at Bambuí, Pará and Samburá rivers next to confluence with São Francisco river (Figure 1). Samples were performed by local fishermen previously trained by the research team, each three days from November 2019 to February 2020, covering most of the reproductive period of migratory fishes from this basin (Bazzoli, 2003). Samples were taken in the main channel,

between 4:00 and 5:30 pm, using a 500- $\mu$ m mesh conical plankton net, with an adapted flowmeter, to calculate the volume filtered. The net was submerged approximately 20 cm deep in running water by 10 min, and water temperature was measured every sample.



**Figure 1.** Tagging site, environmental variables gauging station, floodplain, fixed telemetry stations (TRA - transition from lotic stretch of São Francisco river to Três Marias reservoir; PA1 – confluence of Pará with São Francisco river; PA2 – Pará river 50 km upstream PA1; BA1 – Bambuí river 1 km upstream from the confluence with São Francisco river; BA2 – Bambuí river 50 km upstream BA1; SA1 – Samburá river 8 km upstream the confluence with São Francisco river; SA2 – Samburá river 34 km upstream SA1; SF1 – São Francisco river 50 km upstream PA1; SF2 - São Francisco river 50 km upstream SF1; SF3 - São Francisco river 112 km upstream SF2; SF4 - São Francisco river 128 km upstream SF3), and eggs and larvae sampling points (SFU, SFM, SFL, PAR, BAM, SAM) of *Prochilodus argenteus*.

## 2.7 DNA metabarcoding identification of eggs and larvae

Considering the main peaks of eggs and larvae density, 33 samples (25 egg and 8 larval samples) from all points were chosen for species level identification using DNA metabarcoding, using the high-performance *Illumina* method. DNA was extracted using the *Salting-out* method adapted (Aljanabi and Martinez 1997), quantified in a spectrophotometer NanoDrop 2000 (Thermo Scientific), and normalized to 100ng/ $\mu$ l. A fragment of 655pb from edge 5' from mitochondrial gene COI was amplified via PCR by a combination of different



*primers* (Fish F1 and FishR1), modified from previously published sequences. The original sequences received a tail (*illumina* preadaptor) complementary to the adapter used in the subsequent PCR. This reaction was performed with water to monitor contamination (negative control), in addition to a positive control. Then, the results of the PCR were purified with magnetic beads (Agencourt AMPure XP® – Beckman Coulter).

After purification, a second PCR was performed with the adapters of the Nextera Index kit® (*Illumina*) to amplify the set of amplicons from the previous step. In this reaction, adapters compatible with the next-generation *Illumina* sequencing system (P5 and P7) were used as primers. A combination of unique index (specific sequences associated with the *Illumina* adapter) was used for further identification of each sample, since all points form a single sequencing set. The amplification product was evaluated on a 1.5% agarose gel. Samples were considered successfully amplified at second PCR when they presented the expected band pattern for the COI fragment (655bp COI + 60bp adapter + 64bp index = 780bp).

The absence of contamination in samples was confirmed when amplification was not observed for the negative control. In sequence, the PCR products were then purified again with magnetic beads (Agencourt AMPure XP® – Beckman Coulter), quantified in Nanodrop and normalized to 20ng/μl. The solution obtained was denatured and loaded onto equipment MiSeq® (*Illumina*), using sequencing kit Miseq v3 300cycles (2x150pb) with a final concentration of 16 pM. All samples were pooled and purified with the Zymoclean™ Large Fragment DNA Recovery kit (Zymo Research), to remove spurious fragments in relation to the desired fragment size (655pb COI + 60pb adapter + 64pb index = 780pb). Using a real-time PCR, performed with the reagent KAPA Biosystems Quantification Kit (*Illumina*), the pool was quantified, diluted to a concentration of 2nM and quantified again, resulting in the final concentration. The final solution was denatured and loaded on the MiSeq® equipment (*Illumina*), using the Miseq v3 300cycles sequencing kit (2x150pb) with a concentration of 16 pM.

## 2.8 Data Analysis

Data from fixed stations were downloaded regularly and records were validated according to register sequence and signal strength. Records with few registers (<3) and/or with only very low-strength signals (<100 on a scale ranging from 0 to 255) were discarded because there was a high probability that they were caused by external interference in the receiver. A sequence of regular signals with increasing strength and reaching power bigger

than 150 detected by the same fixed station were considered a valid fish presence. Records with interval among registers smaller than those of burst rate of transmitters were also discarded. A similar procedure was used to validate records made by boat tracks. The motion-sensing of transmitters shows when fish were more than 24h immobile. However, if fish were detected immobile in a boat track but was posteriorly detected active in a new boat track, these fish were considered active, once it started to move again.

Possible differences in weight and standard length among upstream migrant and non-migrating fish were tested with a non-parametric Mann-Whitney test, once both showed non-normal distribution. Condition factor was assessed by an analysis of covariance (ANCOVA), in which migrating upstream vs non-migrating fish was the independent variable, standard length was the covariate, and log transformed weight was the dependent variable. All these analyses considered only detectable and active fishes (R Core Team, 2022).

Data processing from eggs and larvae was performed with a custom script in R, using the DADA2 (Callahan *et al.*, 2016) and Phyloseq (McMurdie and Holmes, 2013) packages, as well as the Cutadapt program (Martin, 2011). The reads obtained in the sequencing were automatically demultiplexed by the Basespace platform (*Illumina*). Initially, the removal of indeterminate bases (Ns) and the detection and removal of sequences corresponding to the primers was performed. Then, the removal of reads with quality lower than PHRED 20 (1 error every 100 bp) was performed. The classification was carried out with sequences available in BOLD (<https://www.boldsystems.org/>), containing 114,425 vertebrates, using a Bayesian classifier integrated in the DADA2 package. Additionally, the DNA sequences (reads) were submitted to similarity search against the NCBI nr database, using the BLASTn tool (Altschul *et al.*, 1990), with sequence coverage thresholds > 85% and sequence identity > 80%. The identifications were curated individually for each sample.

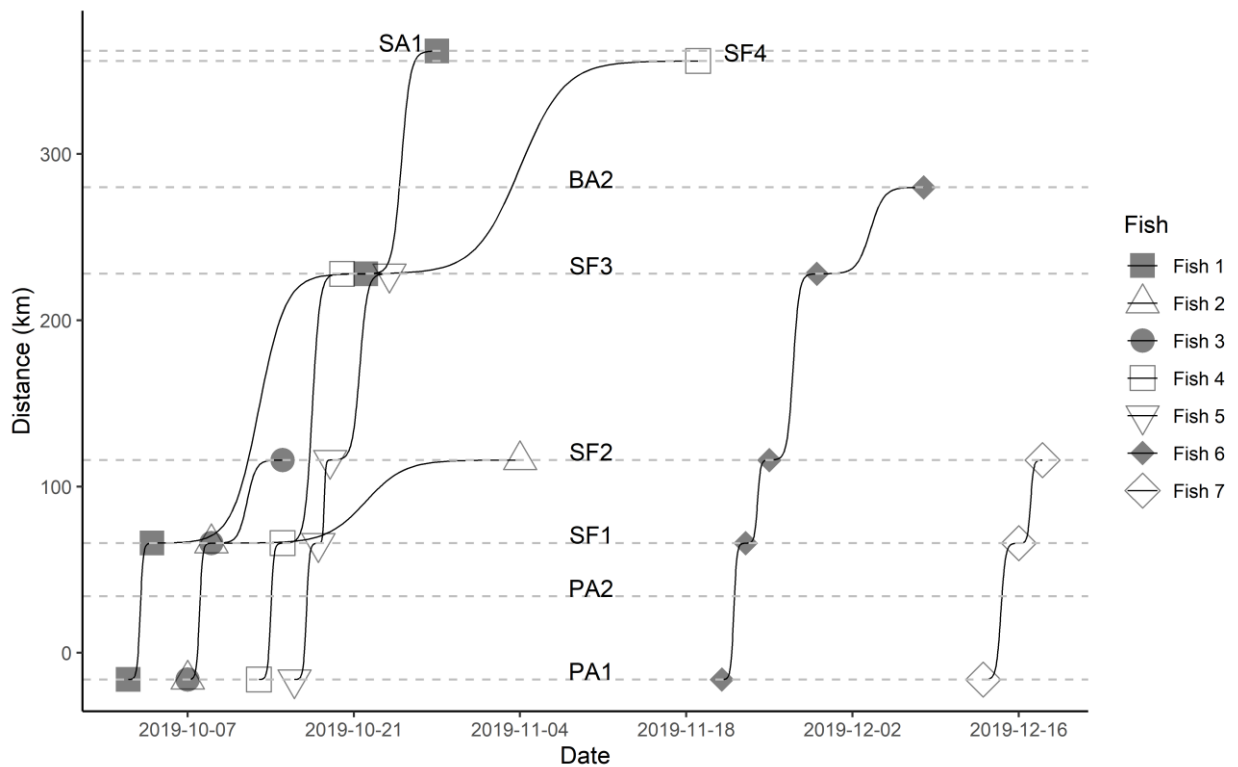
### 3. RESULTS

#### 3.1 Radiotelemetry

A total of 25 fish were tagged, ranging from 305 – 506 mm (mean = 377.68 ± 45.96 cm) total length, 262 – 435 mm (mean = 319.16 ± 44.83 mm) standard length, and weighing from 500 – 2,425g (mean = 941.6 ± 442.32 g). All of which were considered adults, once adults, once females and males reach sexual maturity at 27.5 and 27 cm in total length, respectively (Bazzoli, 2003). The ratio between tag and fish weight varied from 0.4 – 2.0 %. Nine fish left tagging site being registered by at least one fixed station, ten fishes were registered by tracks, mainly in the surroundings of the tagging site, and the remaining six fish

(24%) were never detected after tagging. Among ten fish recorded by tracks, five remained nearby to the tagging site, but showing activity and detectable transmitters nearby to tagging site, and five (20% of the total) were still.

Among the nine fish that left the tagging site, one of them entered the Três Marias reservoir, a second remained next to the Pará river mouth, and seven (50% of 14 registered and active fish) left the Pará river to upstream areas in the São Francisco and its tributaries. One entered the Samburá river and remained next to river mouth, approximately 365 km upstream of the tagging site, and another entered at least 50 km upstream along the Bambuá river, approximately 280 km from the tagging site. The others reached upper stretches of São Francisco river, one at least 357 km upstream from the tagging site, another at least 228 km, and three at least 116 km upstream from the tagging site. Among the upstream migrants, five began migration before October 16th, while one began migration in November, and another in December (Figure 2). These upstream migrant fish initiated downstream migrations from December 2nd 2019 until March 12th 2020, reaching the tagging site ( $n = 1$ , fish 4 of figure 2) or entering the Três Marias reservoir ( $n = 2$ ; fish 1 and 3 of figure 2), from December 3rd 2019 until March 26th 2020. Four fishes had no return registered.



**Figure 2.** Passages of each fish through fixed station along upstream migration, considering period (X-axis) and distance from tagging site (Y-axis) at 2019. Fixed telemetry stations: PA1

- Pará river mouth; SF1 – 50 km upstream PA1; SF2 – 50 km upstream SF1; SF3 – 112 km upstream SF2; SF4 = 128 km upstream SF3; BA1 – Bambuí river mouth; BA2 - 50 km upstream BA1; SA1 = Samburá 8 km upstream river mouth. Tagging site was located on the Pará river 16 km upstream PA1. Filled symbols shows fish that returned downstream (Fish 1 and 3 entered Tres Marias reservoir, and fish 6 returned to tagging site).

**Table 1.** Biometric and displacement data of the 14 analyzed curimatá-pacu *Prochilodus argenteus* tagged: Standard length, body weight, minimum migrated distance (negative signal indicates fish moving downstream in São Francisco river), date of entrance in the São Francisco river (located 10km downstream tagging site), and destiny of migration. Negative values represent downstream movements.

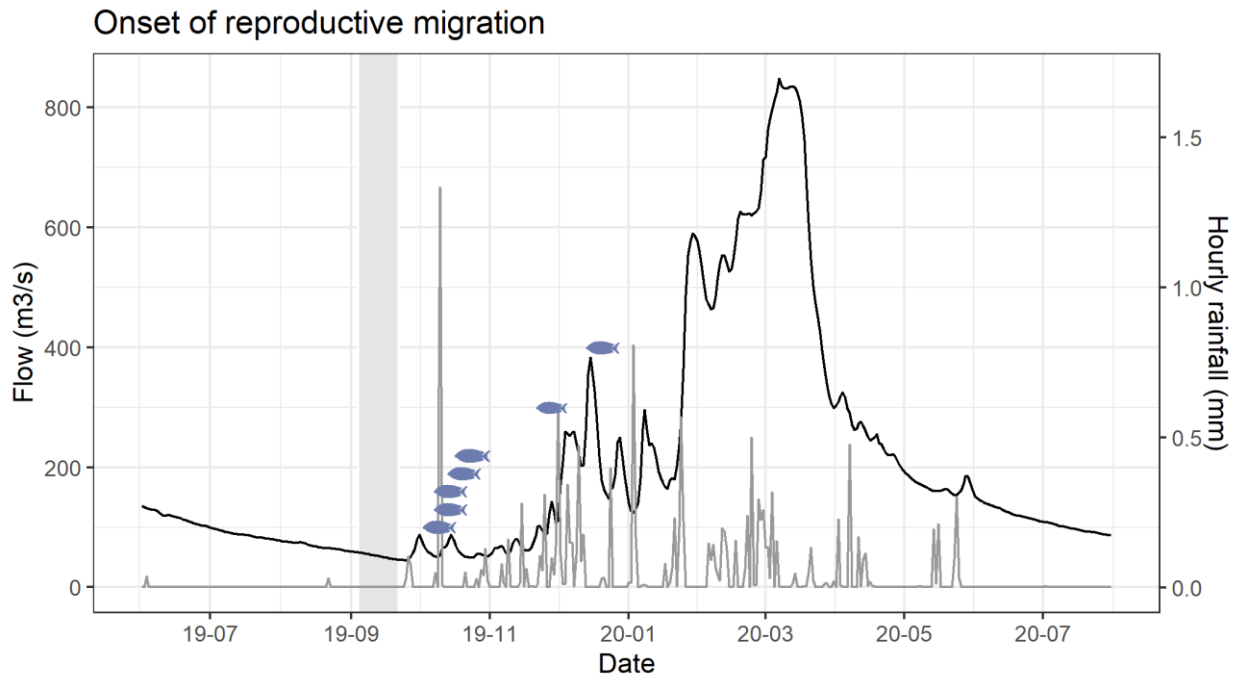
Tagging date	Standard length (cm)	Body weight (g)	Migrated distance (km)	Onset migration date	Destiny
15/09/2019	272	600	270	2019-11-21	Bambuí
22/09/2019	281	615	110	2019-12-13	São Francisco
15/09/2019	291	685	110	2019-10-07	São Francisco
14/09/2019	295	720	-10	2019-10-07	São Francisco
22/09/2019	304	730	110	2019-10-07	São Francisco
14/09/2019	297	735	0	-	Tagging site
06/09/2019	301	790	0	-	Tagging site
09/09/2019	309	790	0	-	Tagging site
14/09/2019	312	825	-20	2019-10-05	Três Marias
09/09/2019	307	860	0	-	Tagging site
05/09/2019	368	1,150	220	2019-10-16	São Francisco
19/09/2019	356	1,250	0	-	Tagging site
05/09/2019	370	1,320	350	2019-10-13	São Francisco
14/09/2019	435	2,425	370	2019-10-02	Samburá

The migration onset took place at first flow increase, which occurred approximately during the first fortnight of October. First rainfall peaks also occurred during mid-October and also previous to the onset of migration, but the highest rainfall peaks took place just after the migration period began (Figure 3). Weight ( $W = 28$ ,  $p = 0.7$ ) and standard length ( $W = 25$ ,  $p=1$ ) did not differ among upstream and non-upstream migrant fishes. Condition was also similar among both groups (ANCOVA:  $F= 3.57$ ,  $p = 0,09$ ) and there was no interaction among independent variables ( $F=0.09$ ,  $p=0.77$ ).

### 3.2 Eggs and larvae

A total of 244 samples of eggs and larvae were taken considering all sampling points. From the 25 eggs samples and 8 larvae samples used for metabarcoding identification, only two presented eggs and other two presented larvae of *Prochilodus argenteus*. All sampled eggs were from the upper São Francisco (SFU,  $n=33$ ) and Samburá (SAM,  $n=200$ ), both

sampled at 01/24/2020. Larvae were sampled next to the mouth of Bambuí (BAM, n=8) and Pará (PAR, n=3) rivers.



**Figure 3.** Onset of *Prochilodus argenteus* upstream migration related to river flow and rain at São Francisco river, from June 2019 - July 2020. Each fish picture at figure means one individual beginning upstream migration; gray bars represent tagging period (7-22 September 2019).

#### 4. DISCUSSION

Upstream movements of *Prochilodus argenteus* began in October after the beginning of rainy season and first increase in river levels, and extended until December. These fish migrate toward the headwaters, reaching spawning sites located in the main channel and tributaries, upstream the floodplains. Additionally, eggs and larvae data show that spawning is concentrated at the same sites. Few individuals were reported returning downstream to the tagging site or to Tres Marias reservoir. Exactly half of active and detectable fishes migrated upstream, and neither condition factor nor size were associated with the decision to migrate. Therefore, the observed patterns for upstream migration, spawning site location, upstream migration triggers, and partial migratory behavior for *P. argenteus* were very similar to *P. costatus* (Lopes *et al.*, 2018; 2019), although the outcomes of downstream migration need to be better assessed for *P. argenteus* (Table 2).

Agostinho *et al.* (2003) reported that a fraction of shoals from tagged *P. lineatus* and *Salminus brasiliensis* (= *S. maxillosus*) remained in the same place where they were released, suggesting that populations of these species could reproduce without migrating. Here, around half of tagged fish migrated upstream, but egg samples showed that spawning of *P. argenteus* was spatially restricted in the upper stretches above the floodplains, indicating that only those fish who is present at upstream sites would spawn. It is known that floodplains are the main nursery areas (Godinho and Kynard, 2006; Sato *et al.*, 1988), where larvae and juveniles have ideal conditions for development, like high food availability and refuge from predators (Baumgartner *et al.*, 1997; Suzuki *et al.*, 2009). Place of spawning is critical because *Prochilodus* larvae deplete their vitelline reserves up to ten days following spawning, so if arrival to floodplain is delayed, larvae could starve to death in the river channel (Brown and Fuentes, 2010; Lozano *et al.*, 2019). In this way, flow condition is also critical, once river channel needs enough discharge to flow to the floodplain. In fact, increasing flow when the river level is still low seems to trigger upstream migration for *P. argenteus*, as reported previously for *P. costatus* (Lopes *et al.*, 2018). Spawning occurring as sooner as possible could increase survival, because shorter times in floodplain make juvenile fish returns to river channel while still relatively small, which could reduce survivorship (Lozano *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2020; Suzuki *et al.*, 2009).

Partial migration occurs when populations are composed of both migratory and resident individuals (Chapmann *et al.*, 2011). Since exactly half of detectable and active fishes migrated upstream, and spawning is restricted to fish present at spawning sites, *P. argenteus* may be considered a partial migrant with a ‘skipped breeding’ strategy (Shaw and Levin, 2011), similar to *P. costatus* (Lopes *et al.*, 2019). Individual physiological differences are a potential driver of partial migration (Chapmann *et al.*, 2011), and, for northern fishes, it is known that condition factor (Brodersen *et al.* 2008) and size (Keefer *et al.* 2009) play a role in the decision to migrates, but there is no information for neotropical fishes. However there were no differences in body condition between fish that migrated upstream or not for *P. argenteus*, indicating no role of past conditions of food availability on migration decision. Maybe it occurs because *Prochilodus* are detritivorous fishes (Bowen, 1983), and detritus is a hyperabundant and widely available resource in neotropical basins (Bowen, 2022; Carolsfeld *et al.*, 2003), which means that food could not be a limitant factor for detritivourous fishes. However, the role of trophic guild on migratory behavior remains unexplored in tropical fish communities.

**Table 2.** Comparison among *Prochilodus argenteus* (this study) and *P. costatus* (Lopes *et al.*, 2018; Lopes *et al.*, 2019) migration patterns at São Francisco river basin upstream the Três Marias dam.

<b>Migratory traits</b>	<b><i>P. argenteus</i></b>	<b><i>P. costatus</i></b>	<b>Additional considerations</b>
Upstream migratory window	Early October – mid-December	Late September - mid-December	<i>P. costatus</i> : varies among years. <i>P. argenteus</i> : Concentrates in Oct - Nov but extends from Oct-Dec. It is suspected that can be extended with more reproductive seasons.
Upstream migration triggers	Increase in water level	Increase in water level	Both species: most are triggered when water levels are still low, but some wait for higher flows peaks, in Nov -Dec.
Upstream migration distance	100-365 km	100-365km	<i>P. costatus</i> : Distance depends on location of feeding site in relation to spawning site; <i>P. argenteus</i> : distance is related to size.
Partial migration	Skipped breeding	Skipped breeding	<i>P. costatus</i> : the fraction of migrants increases with flow. <i>P. argenteus</i> : needs more data
Influence of condition factor and size on migration behaviour	No	-	Factor that play a significant role in the decision to migrate needs better investigation for both species
Spawning sites	Upper stretches above floodplains	Upper stretches above floodplains	By the authors personal observations, both spawn at the same sites, including the main tributaries Bambuí and Samburá
Downstream migratory window	December - March	December -May	<i>P. costatus</i> : Downstream movements mainly from Dec - Mar, though extendable to May. <i>P. argenteus</i> : Increase in sampling effort can extend this window similarly to <i>P. costatus</i> .
Destiny of downstream migration	Feeding site or Três Marias reservoir	High fidelity to feeding site	<i>P. costatus</i> : well established <i>P. argenteus</i> : needs more data

In contrast to *Prochilodus costatus* which show high fidelity to feeding sites in downstream migration (Lopes *et al.*, 2018), only one individual of *P. argenteus* returning to the same feeding site, although two other individuals returned downstream too, but entered into the Três Marias reservoir. Four fishes that migrated upstream were not registered as having returned, although there is some evidence that this could have been due to tag failure. For instance, research team observed just eight tags remained detectable one year after tagging, although tags have an expected battery life of 659 days. Non-detectable tags could occur due to failure of fishing, while immobile tags could occur due to death after tagging. Tag expulsion could also occur, and such phenomena usually occurs three months after tagging, and affecting up to 20% of tagged fish (Peressin *et al.*, 2021). Thus, it is possible that within three months, a tagged fish was detected by the fixed stations during the upstream migration, but expelled the tag at the spawning site, and thus returned undetected by the stations, as downstream return occurs four to seven months after the upstream migration.

The spatially concentrated spawning sites of both species means that most population of the upper São Francisco river basin above Três Marias reservoir is supported by a few known spawning sites located in stretches of the São Francisco and its main tributaries. In this way, considering that implementation of fishing ban periods is strongly limited by the number of inspectors, it could be necessary to focus efforts at spawning sites during the spawning season. Concerningly, these spawning sites are usually located in small rivers and, nowadays, Brazilian law states that small power plants able to generate 10 MW or less causes non-significant impacts and do not require environmental assessment studies (CONAMA, 2001). However, results about *P. argenteus* presented here indicates that impacts of small power plants located at small rivers could be very significant if located at spawning sites.

Flow condition is also pointed as trigger for adult migration and necessary condition for growing larvae in floodplains, and, in this way, downstream flow regulation promoted by hydroelectric power plants will likely inhibit migration as it promotes discharge regularization and the reduction of yearly peak flows, as well the increase of daily peak flows (regulated by electricity consumption). Aiming to conserve migratory fish populations living downstream dams, Reid *et al.* (2018) proposed E-flows (environmental flows) used to keep original environmental characteristics, such as minimal flow level to allow the flooding of floodplains. So, the discharge required to promote migration and flood the floodplains needs to be investigated and incorporated into dam operations, as proposed by Godinho *et al.* (2007). It may also be important to



consider upstream migratory windows, the onset of upstream migration, and spawning period, to flood the floodplains during the right period. Otherwise, impoundments will keep on severely reducing or depleting long distance migratory fish populations, with negative consequences for *Prochilodus* species, one of the most important components of South American fisheries (Melo *et al.*, 2016).

The combination of biotelemetry, eggs and larvae sampling, and metabarcoding species identification reveal novel and fine-scale information about migratory patterns of *P. argenteus*. The apparently low number of adult tagged fish is compensated by spatial and temporal precision of information provided by biotelemetry, as well as a great eggs and larvae sampled. These result in a observation of conspicuous migratory patterns, corroborated by similarity to those described in the same region for *P. costatus*. One of the major challenges for fish conservation in the Neotropical region is how to propose conservation strategies that can support megadiverse fauna and this study shows that complex behavior like migratory traits can be shared by different species. Among the *Prochilodus* species, *P. costatus* and *P. argenteus* are phylogenetic distant, and belong to different clades (Melo *et al.* 2016). Therefore, it is possible that similar migratory patterns are widespread within the group. Our results also point to a novel discovery for neotropical fishes, a positive relationship between body size and migration distance, which should also be better assessed for other migratory species. However, more data is needed to investigate the outcomes of downstream migrants in *P. argenteus*, and improve knowledge about flow thresholds related to migration decisions, as well as the role of dietary habits on migratory patterns, an unexplored topic in Neotropical migratory fish ecology. Finally, new studies should investigate if the migratory traits of *Prochilodus* species are shared with other long-distance migratory fishes (such as *Salminus*, *Megaleporinus*, *Pseudoplatystoma* and *Brycon*) and possible associations with phylogenic relationships among fish taxa.

## REFERENCES

- Agostinho A.A., Gomes L. C., Suzuki H. I. & Julio-Junior H. F. (2003) Migratory fishes of the upper Parana river basin, Brazil. In: J. Carolsfeld, B. Harvey, C. Ross & A. Baer (eds) *Migratory Fishes of South America: biology, fisheries and conservation status* (pp. 19-98). Ottawa: IDRC:World Bank.
- Agostinho, A. A., Gomes, L. C., & Pelicice, F. M. (2007). *Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatórios do Brasil*. Maringá, PR: UEM.
- Aljanabi, S. M., Martinez, I. (1997) Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques. *Nucleic acids research*, **25**(22), 4692-4693.

- Altschul, S. F., Gish, W., Miller, W., Myers, E. W., & Lipman, D. J. (1990) Basic local alignment search tool. *Journal of Molecular Biology*, **215**(3), 403–410.
- Baumgartner, G., Nakatani, K., Cavicchioli, M., & Baumgartner, M. D. S. T. (1997). Some aspects of the ecology of fish larvae in the floodplain of the high Paraná river, Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia*, *14*(3), 551-563.
- Bazzoli, N. (2003) Parâmetros reprodutivos de peixes de interesse comercial na região de Pirapora. In: Godinho H.P. & Godinho A.L. (eds) *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais* (pp. 291–306). Belo Horizonte, MG: Pontifícia Universidade Católica.
- Bido, A. F., Urbinati, E. C., Makrakis, M. C., Celestino, L. F., Serra, M., & Makrakis, S. (2018). Stress indicators for *Prochilodus lineatus* (Characiformes: Prochilodontidae) breeders during passage through a fish ladder. *Marine and Freshwater Research*, **69**, 1814–1821. <https://doi.org/10.1071/MF18087>
- Birnie-Gauvin, K., Aarestrup, K., Riis, T. M., Jepsen, N., & Koed, A. (2017). Shining a light on the loss of rheophilic fish habitat in lowland rivers as a forgotten consequence of barriers, and its implications for management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **27**(6), 1345-1349.
- Bowen, S. H. (1983). Detritivory in neotropical fish communities. *Environmental Biology of Fishes*, **9**(2), 137-144.
- Bowen, S. H. (2022). The river flood pulse, benthic biofilm, and the nutrition of *Prochilodus lineatus*. *Environmental Biology of Fishes*, 1-18.
- Brodersen, J. et al. (2008) Condition-dependent individual decision-making determines cyprinid partial migration. *Ecology*, **89**(5), 1195-1200.
- Brown, D. R., & Fuentes, C. M. (2010). Daily increments in otoliths of sábalo (*Prochilodus lineatus*) larvae. *Journal of Applied Ichthyology*, *26*(1), 123-125.
- Callahan, B. J., McMurdie, P. J., Rosen, M. J., Han, A. W., Johnson, A. J. A., & Holmes, S. P. (2016) DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature Methods*, **13**(7), 581–583.
- Camargo, S.A.F. & Petreire, M. (2001) Social and financial aspects of the artisanal fisheries of middle São Francisco river, Minas Gerais, Brazil. *Fisheries Management and Ecology*, **8**, 163–171.
- Carolsfeld, J. (2003). *Migratory fishes of South America: biology, fisheries and conservation status*. Ottawa, Idrc: World Bank.
- Celestino, L. F., Sanz-Ronda, F. J., Miranda, L. E., Makrakis, M. C., Dias, J. H. P., & Makrakis, S. (2019). Bidirectional connectivity via fish ladders in a large Neotropical river. *River Research and Applications*, **35**(3), 236-246.
- Cemig. 2006. *Usinas da Cemig: 1952-2005, a história da eletricidade em Minas e no Brasil*. Rio de Janeiro, RJ: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil.
- Chapman, B. B., Brönmark, C., Nilsson, J. Å., & Hansson, L. A. (2011) The ecology and evolution of partial migration. *Oikos*, **120**(12), 1764-1775.
- CODEVASF. 1991. *Inventário dos projetos de irrigação*. Brasília, DF: CODEVASF.
- CONAMA (2001) Conselho Nacional de Meio Ambiente, resolução 279. Brasília, DF.

- Dugan, P. J., Barlow, C., Agostinho, A. A., Baran, E., Cada, G. F., Chen, D., ... & Winemiller, K. O. (2010) Fish migration, dams, and loss of ecosystem services in the Mekong basin. *Ambio*, **39**(4), 344-348.
- Duponchelle, F., Isaac, V. J., Rodrigues Da Costa Doria, C., Van Damme, P. A., Herrera-R, G. A., Anderson, E. P., ... & Castello, L. (2021). Conservation of migratory fishes in the Amazon basin. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **31**(5), 1087-1105.
- Duque, A. B., Taphorn, D. C., & Winemiller, K. O. (1998) Ecology of the coporo, *Prochilodus mariae* (Characiformes, Prochilodontidae), and status of annual migrations in western Venezuela. *Environmental Biology of Fishes*, **53**(1), 33-46.
- Esguícero, A. L., & Arcifa, M. S. (2010). Fragmentation of a Neotropical migratory fish population by a century-old dam. *Hydrobiologia*, **638**(1), 41-53.
- Flecker, A. S. (1996). Ecosystem engineering by a dominant detritivore in a diverse tropical stream. *Ecology*, **77**(6), 1845–1854. <https://doi.org/10.2307/2265788>
- Fries, L., Hahn, L., Meneses, B. A., Câmara, L. F. D., Becker, F. G., & Hartz, S. M. (2019). Movement and longitudinal distribution of a migratory fish (*Salminus brasiliensis*) in a small reservoir in southern Brazil. *Neotropical Ichthyology*, **17**(3). <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20180119>
- Garcia, A., Tello, S., Vargas, G. & Duponchelle, F. (2009) Patterns of commercial fish landings in the Loreto region (Peruvian Amazon) between 1984 and 2006. *Fish Physiology and Biochemistry*, **35**, 53–67. <http://dx.doi.org/10.1007/s10695-008-9212-7>.
- Gehrke, P. C., Gilligan, D. M., & Barwick, M. (2002). Changes in fish communities of the Shoalhaven River 20 years after construction of Tallowa Dam, Australia. *River Research and Applications*, **18**(3), 265-286.
- Godinho, A. L., Brito M. F. G. & Godinho H.P. (2003) Pesca nas corredeiras de Buritizeiro: da ilegalidade a gestão participativa. In: H. P. Godinho & A. L. Godinho (eds) *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais* (pp. 347–360). Belo Horizonte, MG: Pontifícia Universidade Católica Universidade de Minas Gerais.
- Godinho, A. L. & Godinho, H.P. (2003) Breve visão do São Francisco. In: H. P. Godinho & A. L. Godinho (eds) *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais* (Pp. 15-24). Belo Horizonte: PUC Minas.
- Godinho, A. L., & Kynard, B. (2006) Migration and spawning of radio-tagged zulega *Prochilodus argenteus* in a dammed Brazilian river. *Transactions of the American Fisheries Society*, **135**(3), 811-824.
- Godinho, A.L.; Kynard, B. & Martinez, C.B. (2007) Supplemental water releases for fisheries restoration in a Brazilian floodplain river: a conceptual model. *River Research and Applications*, **23**, 947–962.
- Hahn, L., Agostinho, A. A., English, K. K., Carosfeld, J., Da Camara, L. F., & Cooke, S. J. (2011) Use of radiotelemetry to track threatened dorados *Salminus brasiliensis* in the upper Uruguay River, Brazil. *Endangered Species Research*, **15**(2), 103-114.
- Keefer, M. L., Moser, M. L., Boggs, C. T., Daigle, W. R., & Peery, C. A. (2009) Effects of body size and river environment on the upstream migration of adult Pacific lampreys. *North American Journal of Fisheries Management*, **29**(5), 1214-1224.

- Lopes, J. M., Alves, C. B. M., Silva, F. O., Bedore, A. G., & Pompeu, P. S. (2016) Effect of anesthetic, tag size, and surgeon experience on postsurgical recovering after implantation of electronic tags in a neotropical fish: *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1837)(Characiformes: Prochilodontidae). *Neotropical Ichthyology*, **14**.
- Lopes, J.M., Alves, C. B. M., Peressin, A. & Pompeu, P. S. (2018) Influence of rainfall, hydrological fluctuations, and lunar phase on spawning migration timing of the Neotropical fish *Prochilodus costatus*. *Hydrobiologia*, **818**(1), 145-161.
- Lopes, J. D. M., Pompeu, P. S., Alves, C. B. M., Peressin, A., Prado, I. G., Suzuki, F. M., Facchin, S. & Kalapothakis, E. (2019). The critical importance of an undammed river segment to the reproductive cycle of a migratory Neotropical fish. *Ecology of Freshwater Fish*, **28**(2), 302-316.
- Lozano, I. E., Llamazares Vegh, S., Gómez, M. I., Piazza, Y. G., Salva, J. L., & Fuentes, C. M. (2019). Episodic recruitment of young *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1836)(Characiformes: Prochilodontidae) during high discharge in a floodplain lake of the River Paraná, Argentina. *Fisheries Management and Ecology*, **26**(3), 260-268.
- Martin, M. (2011) Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. *EMBnet.Journal*, **17**(1), 10.
- McMurdie, P. J. & Holmes, S. (2013) phyloseq: An R Package for Reproducible Interactive Analysis and Graphics of Microbiome Census Data. *PLoS ONE*, **8**(4), e61217.
- Melo, B. F., Sidlauskas, B. L., Hoekzema, K., Frable, B. W., Vari, R. P., & Oliveira, C. (2016) Molecular phylogenetics of the Neotropical fish family Prochilodontidae (Teleostei: Characiformes). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, **102**, 189-201.
- Nilsson, C., Reidy, C. A., Dynesius, M., & Revenga, C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *science*, **308**(5720), 405-408.
- O'Brien, G. C., Ross, M., Hanzen, C., Dlamini, V., Petersen, R., Diedericks, G. J., & Burnett, M. J. (2019) River connectivity and fish migration considerations in the management of multiple stressors in South Africa. *Marine and Freshwater Research*, **70**(9), 1254-1264.
- Oliveira, A. G. D., Lopes, T. M., Angulo-Valencia, M. A., Dias, R. M., Suzuki, H. I., Costa, I. C. B., & Agostinho, A. A. (2020). Relationship of Freshwater Fish Recruitment With Distinct Reproductive Strategies and Flood Attributes: A Long-Term View in the Upper Paraná River Floodplain. *Frontiers in Environmental Science*, 192.
- Peressin, A., Lopes, J. D. M., Bedore, A. G., Alves, C. B. M., Prado, I. G., & Pompeu, P. S. (2021). Radiotagging a long-distance migratory characid fish: reproduction after surgery, tag losses, and effects in weight. *Neotropical Ichthyology*, **19**(2):e200097
- R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. URL <https://www.R-project.org/>.
- Reid, A. J., Carlson, A. K., Creed, I. F., Eliason, E. J., Gell, P. A., Johnson, P. T., ... & Cooke, S. J. (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, **94**(3), 849-873.
- Resende, E. K., (2003) Paraguay-Paraná Basin Excluding the Upper Paraná Basin. In: Carolsfeld J, Harvey B, Ross C & Baer A (eds) *Migratory fishes of South America* (pp. 99-147). Ottawa: IDRC:World Bank.

- Ros, A. E., Sverlij, S., Amestoy, F., & Spinetti, M. (1998) Migration pattern of the sábalo *Prochilodus lineatus* (Pisces, Prochilodontidae) tagged in the lower Uruguay River. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, **26**(5), 2234-2236.
- Sato, Y.; Cardoso, E.L. & Amorim, J.C.C. (1988) Peixes das lagoas marginais do rio São Francisco, a montante da represa de Três Marias (Minas Gerais). CODEVASF, Brasília.
- Sato, Y., Cardoso E.L., Godinho A.L. & Godinho, H.P. (1996) Hypophysation parameters of the fish *Prochilodus marggravii* obtained in routine hatchery station conditions, **56**, 59–64.
- Sato, Y. & Godinho, H. (2003) Migratory Fishes of the São Francisco River. In: J. Carolsfeld, B. Harvey, C. Ross C & A. Baer (eds) *Migratory fishes of South America* (pp. 195-232). Ottawa, IDRC:World Bank.
- Sato, Y., Fenerich–Verani, N. & Godinho, H.P. (2003) Reprodução induzida de peixes da bacia do São Francisco. In: H.P.Godinho & A.L.Godinho (eds) *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais* (pp. 277–290). Belo Horizonte, MG: Pontifícia Universidade Católica.
- Shaw, A. K., & Levin, S. A. (2011) To breed or not to breed: a model of partial migration. *Oikos*, **120**(12), 1871-1879.
- Silva, P. A., Vieira, G. G., Farinasso, M. I. G. U. E. L., & Carlos, R. J. (2003) Determinação da extensão do rio São Francisco. *XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 393-394.
- Silva, L. G. M. (2012). Parâmetros migratórios e transposição de curimatás e mandis-amarelos no médio Rio Grande. In J. M. Lopes, F. O. Silva (Eds) *Transposição de Peixes*. Belo Horizonte, Brazil: Companhia Energética de Minas Gerais, pp. 111-131.
- Silva, E. A., & Stewart, D. J. (2017) Reproduction, feeding and migration patterns of *Prochilodus nigricans* (Characiformes: Prochilodontidae) in northeastern Ecuador. *Neotropical Ichthyology*, **15**.
- Summerfelt, R. C., & Smith, L. S. (1990) Anesthesia, surgery and related techniques. In C. B. Schreck & P. B. Moyle (eds) *Methods for fish biology* (pp. 213–272). Bethesda, MD: American Fisheries Society.
- Suzuki, H. I., Agostinho, A. A., Bailly, D., Gimenes, M. F., Júlio-Junior, H. F., & Gomes, L. C. (2009). Inter-annual variations in the abundance of young-of-the-year of migratory fishes in the Upper Paraná River floodplain: relations with hydrographic attributes. *Brazilian Journal of Biology*, **69**(2), 649-660.
- Taylor, B.W., Flecker, A.S. & Hall, R.O. (2006) Loss of a harvested fish species disrupts carbon flow in a diverse tropical river. *Science*, **313**, 833–836. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1128223>
- Welcomme, R. L. (1990) Status of fisheries in South-American rivers. *Interiencia*, **15**(6), 337-345.
- Winter, J. (1996) Advances in underwater biotelemetry. In B. R. Murphy & D. W. Willis (eds) *Fisheries techniques* (pp. 555–590). Bethesda, MD: American Fisheries Society.

**ARTIGO 3 – REFINANDO O CONHECIMENTO SOBRE USO DO ESPAÇO E  
MIGRAÇÃO PARCIAL EM UM PEIXE NEOTROPICAL**

Alexandre Peressin<sup>1</sup>, Francisco Ricardo de Andrade Neto<sup>1</sup>, João de Magalhães Lopes<sup>2</sup>,  
Lidia Wouters<sup>1</sup>, Carlos Bernardo Mascarenhas Alves<sup>3</sup> e Paulo dos Santos Pompeu<sup>1</sup>

1 – Departamento de Ecologia e Conservação (DEC), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Campus Universitário, Lavras, MG, Brazil. Zip code: 37200-000.

2 – Saneamento de Goiás – SANEAGO, Av. Antônio Torquato, 735, Ouvidor, GO, Brazil, Zip code 75775-000

3 - Bio-Ambiental Consultoria em Meio Ambiente Ltda, R. Rio de Janeiro, 1858/902, Lourdes, Zip code 30160-042, Belo Horizonte, MG, Brazil

## RESUMO

1. O aprofundamento do conhecimento sobre peixes migradores neotropicais tem revelado grandes implicações para a conservação, mas muitos *traits* migratórios permanecem misteriosos em peixes neotropicais, especialmente aqueles relacionados ao uso do espaço e migração parcial. Por isso, a partir de 100 piosas (*Prochilodus costatus*) marcadas com radiotransmissores no sítio de alimentação e 100 no sítio de reprodução, além de coletas de ovos e larvas, foram avaliadas influências de variáveis biométricas no comportamento migratório, bem como mapeamento dos principais sítios reprodutivos, fidelidade a estes sítios e implicações para conservação.

2. Metade dos peixes marcados em 2019 e 2020 realizaram deslocamentos variando entre 100 a 392km à montante. Os destinos foram trechos a montante da planície de inundação, mesmos locais onde foram encontrados ovos da espécie. Peso e fator de condição não influenciaram a decisão de migrar.

3. O sítio de reprodução recebeu peixes oriundos de praticamente todas as partes do trecho livre, mas boa parte dos peixes ali marcados permaneceram no local, indicando que há peixes residentes no sítio de desova.

4. O peso dos peixes do sítio de reprodução é menor que daqueles do sítio de alimentação, e o fator de condição variou entre anos no sítio de reprodução, mas não no de alimentação, indicando que este oferece maior estabilidade na oferta de recursos. Peixes com migrações detectadas em duas ou mais estações reprodutivas o fizeram sempre para o mesmo ponto.

*Síntese e aplicações:* i. Toda a extensão da bacia é considerada um sítio de alimentação, mas poucos sítios de reprodução à montante são essenciais para manutenção da população e devem receber fiscalização especial durante período reprodutivo; ii. Distância migrada pode ser altamente variável devido a localização dos sítios de desova e alimentação de cada indivíduo; iii. Indivíduos apresentam fidelidade aos sítios de desova e alimentação, o que poderia dificultar a adaptação de novas rotas em caso de bloqueio. iii. Simulação de impactos de novas barragens indica que estas causariam colapso reprodutivo da população segregada à jusante e diminuição do tamanho dos peixes segregados à montante; iv. Medidas apontadas para *P. costatus* podem ser aplicáveis a outras espécies.

**Palavras chave:** curimatá-pioa, *Homming*, migração parcial, ecoregião neotropical, *Prochilodus costatus*, rio São Francisco

## ABSTRACT

1. A better knowledge of Neotropical migratory fish has revealed major conservation implications, but many migratory traits remain mysterious, especially those related to space use and partial migration. Therefore, from 100 pioas (*Prochilodus costatus*) radiotagged at their feeding site and 100 at their breeding site, in addition to collecting eggs and larvae, the influences of biometric variables on migratory behavior were evaluated, as well as mapping of the main reproductive sites, fidelity to these sites, and conservation implications.

2. Half of the fish tagged in 2019 and 2020 performed reproductive migrations from 100-392km upstream. The destiny was stretches upstream of the floodplain, the same places where eggs of the species were found. Weight and condition factor did not influence the decision to migrate.

3. The breeding site received fish from almost all parts of the free stretch and reservoir, but many fish tagged at this site remained in the same place, indicating that there are fish residing at the spawning site.

4. The weight of fish from the breeding site is lower than those from the feeding site, and the condition factor varied between years at the breeding site but not at the feeding site, indicating that this offer great resource stability. Fish with migrations detected in two or more breeding seasons always performed migrations to the same spawning site.

*Synthesis and applications:* i. All the extension of the basin is considered a feeding site, but few breeding sites upstream are essential for population maintenance, and must receive special supervision during the reproductive period; ii. Migrated distance can be highly variable due to feeding and breeding site locations of each individual; iii. Individuals show fidelity to spawning and feeding sites, which could make difficult to adapt new routes in case of blockage. iv. Simulation of impacts of new dams indicates that these would cause reproductive collapse of the segregated population downstream and decrease in the size of the segregated fish upstream; v. Knowledge pointed here to *P. costatus* may be applicable to other species.

**Keywords:** Homming, partial migration, *Prochilodus costatus*, curimatá-pioa, Neotropical region, São Francisco river



## 1. INTRODUÇÃO

Estudos recentes têm apontado variações individuais do padrão migratório em diferentes taxa de peixes e bacias hidrográficas do mundo todo (Colborne *et al.* 2022; Hauser *et al.* 2020; Vu *et al.* 2022). No entanto, a migração de animais aquáticos tem recebido menos atenção e seu conhecimento está defasado em relação à taxa terrestres, sendo que apenas a migração de salmões é melhor conhecida em peixes de água doce (Bronmark *et al.* 2014). Este atraso no conhecimento se dá em um momento em que impactos antrópicos têm afetado a reprodução de animais globalmente (Wikelski & Tertitski, 2016; Ficke *et al.* 2007; MacCarty 2001; Dunn & Winkler, 1999). Esta situação que não é diferente entre peixes migradores, que estão entre as espécies mais ameaçadas a despeito de sua relevância ecológica e econômica para milhões de pessoas no mundo todo (Ficke *et al.* 2007; Dudgeon *et al.*, 2006). As causas deste declínio populacional também são parecidas no mundo todo, incluindo perda de hábitat, barreiras físicas, sobre-exploração e mudanças climáticas (Duponchele *et al.*, 2021).

Este nível de ameaça se impõe em um cenário em que a maioria destas espécies não tem seus *traits* migratórios conhecidos em escala suficientemente detalhada. A reprodução intermitente resultante da migração parcial é característica amplamente difundida entre peixes de água doce, mas a maioria dos estudos sobre migração parcial tem foco em espécies cujos animais migrantes e não migrantes se reproduzem (Shaw & Levin, 2011, 2013). Menos é conhecido sobre aquelas espécies em que há sítios de reprodução bem definidos e apenas indivíduos presentes nestes sítios se reproduzem. Esta existência de migração parcial com reprodução intermitente implica em uma decisão de se reproduzir ou não, que segundo Chapmann *et al.* (2011) é induzida por diferenças individuais entre animais da mesma espécie. Para espécies do hemisfério norte, sabe-se que condições prévias à migração, como condição corporal, são fator importante para esta decisão (Birnie-Gauvin *et al.*, 2021), mas não sabemos se o mesmo ocorre para espécies tropicais. Tamanho também influencia comportamento migratório em algumas espécies do hemisfério norte (Keefer *et al.*, 2009), sem que haja esse conhecimento para espécies neotropicais. A fidelidade ao sítio de reprodução é uma característica conspícua de salmões (Vespoor *et al.*, 2008) e também demanda atenção ao pesquisar o comportamento de peixes migradores.

Medidas de conservação e mitigação tem sido aplicadas sem sucesso pelo mundo, especialmente passagens de peixes, quase sempre falhando em manter as populações em seu nível original, ou mesmo causando extinção regional (O'Brien *et al.*, 2019, Reid *et al.*, 2018, Dugan *et al.*, 2010; Pelicice *et al.*, 2008). Assim, a fim de aplicar medidas de manejo eficientes, é necessário decifrar aspectos de ciclo de vida dos

peixes migradores (Birnie Gauvin *et al.* 2021). Considerando a existência de informações prévias, como conhecimento sobre sítios preferenciais de reprodução e alimentação (Lopes *et al.*, 2018; 2019 a e b; 2021), raro em peixes neotropicais, a pioa *Prochilodus costatus* é séria candidata para aprofundamento dos estudos sobre *traits* migratórios. Devido ao seu grande valor como alimento e recurso econômico, os estudos sobre migração de peixes neotropicais têm focado os peixes da família Prochilodontidae como modelo de estudo em diversos rios como o São Francisco (Lopes *et al.*, 2018; Lopes *et al.* 2019a; Godinho and Kynard, 2006), Paraná (Celestino *et al.* 2018; Ros *et al.* 1998), Orinoco (Duque *et al.* 1998) e Amazonas (Silva e Stewart, 2017). *Prochilodus costatus*, por sua vez, é espécie endêmica da bacia do rio São Francisco, onde é conhecida como curimatá-pioa ou apenas como pioa.

Conhecer o comportamento migratório é fundamental para prever como estas espécies socialmente e economicamente tão importantes irão se comportar diante de alterações ambientais de origem antrópica (Birnie Gauvin *et al.*, 2021; Ficke *et al.* 2007). Apesar da existência indubitável da migração reprodutiva de peixes de água doce neotropicais, conhecida como piracema e amplamente relatada na literatura como deslocamento dos sítios de alimentação em direção aos sítios de desova à montante (Carolsfeld *et al.* 2003; Godoy, 1975; Vazzoler & Menezes, 1992), observações pessoais e relatos de pescadores dão conta da ocorrência de algumas destas espécies, incluindo a pioa, por toda a bacia o ano todo, levantando dúvidas sobre residência destes peixes em sítios de desova e, caso comprovada esta residência, quais seriam os motivos para residir longe destes sítios, obrigando estes indivíduos a longas migrações anuais para desova. Desse modo, este estudo buscou responder: i. a proporção de migrantes varia entre estações reprodutivas? ii. Peso e fator de condição determinam se o peixe irá migrar e qual distância irá migrar? iii. Quais são os principais sítios de reprodução? iv. o sítio de reprodução também pode ser local de alimentação interanual da espécie? v. A condição dos peixes é de fato melhor no sítio de alimentação do que no sítio de reprodução? vi. Peixes de diferentes sítios de alimentação podem usar o mesmo sítio de reprodução? vii. Há fidelidade ao sítio reprodutivo?

## 2. MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no trecho superior da bacia do alto São Francisco, compreendendo um remanescente lótico de aproximadamente 450 km. Esse trecho de fluxo livre se estende da nascente histórica (rio São Francisco) e geográfica (rio

Samburá) do rio São Francisco, ambas na serra da Canastra (Silva *et al.* 2003), até o reservatório de 1090 km<sup>2</sup> formado pela barragem de Três Marias (18° S 12'49", 45° W 15'42"), a primeira da calha principal do rio São Francisco (Cemig, 2006). O trecho drena uma área de 14.203 km<sup>2</sup> e outros afluentes importantes do trecho incluem os rios Bambuí e Pará (Fig. 1). Os locais de marcação, situados no rio Pará 16 km à montante da foz no rio São Francisco, e no rio Samburá 8 km à montante da confluência com o rio São Francisco, são reconhecidos sítios de alimentação e reprodução de *Prochilodus costatus*, respectivamente (Lopes *et al.*, 2018; 2019a). O clima da região é tropical úmido, com estação chuvosa que se estende de outubro a março, e a precipitação média anual é de 1.200 a 1.500 mm (CODEVASF, 1991). Segundo a agência nacional de energia elétrica (ANEEL: [www.sigel.aneel.gov.br](http://www.sigel.aneel.gov.br)), há três usinas hidrelétricas previstas para serem construídas nesse trecho, uma a jusante da confluência com o rio Pará, entre os municípios de Abaeté e Pompéu, uma a jusante da confluência com o rio Bambuí, entre as cidades de Luz e Lagoa da Prata e outra entre os municípios de Doresópolis e Bambuí, a jusante da confluência com o rio Samburá.

### 2.3 Captura e marcação

Indivíduos de *P. costatus* foram capturados no sítio de alimentação em setembro de 2019 e em agosto/setembro de 2020. Também foram capturados no sítio de reprodução, em setembro e dezembro de 2019 e agosto/setembro e dezembro de 2020. As capturas foram conduzidas durante dia ou noite por pescadores profissionais da região utilizando tarrafas, para reduzir o estresse e as lesões físicas. Após a captura, todos os peixes foram transportados para viveiros de tela instalados no rio. Em seguida, os peixes eram transportados com redes apropriadas um de cada vez até a estação cirúrgica. Uma vez na estação cirúrgica, os procedimentos de anestesia, cirurgia e recuperação dos peixes seguiram o mesmo descrito em Peressin *et al.* (2021). Após marcação e recuperação, os peixes foram soltos no mesmo sítio onde foram capturados (sítio de alimentação: 19°S 16'49,50", 45°W 4'42,40"; Sítio de reprodução: 20°S 17'43.60", 46°O 7'4.30"). Todos os procedimentos foram realizados sob permissão de captura (SISBIO 10327) e aprovação do comitê de ética da Universidade Federal de Lavras (CEUA UFLA 003/2019).

### 2.4 Monitoramento de radiotelemetria

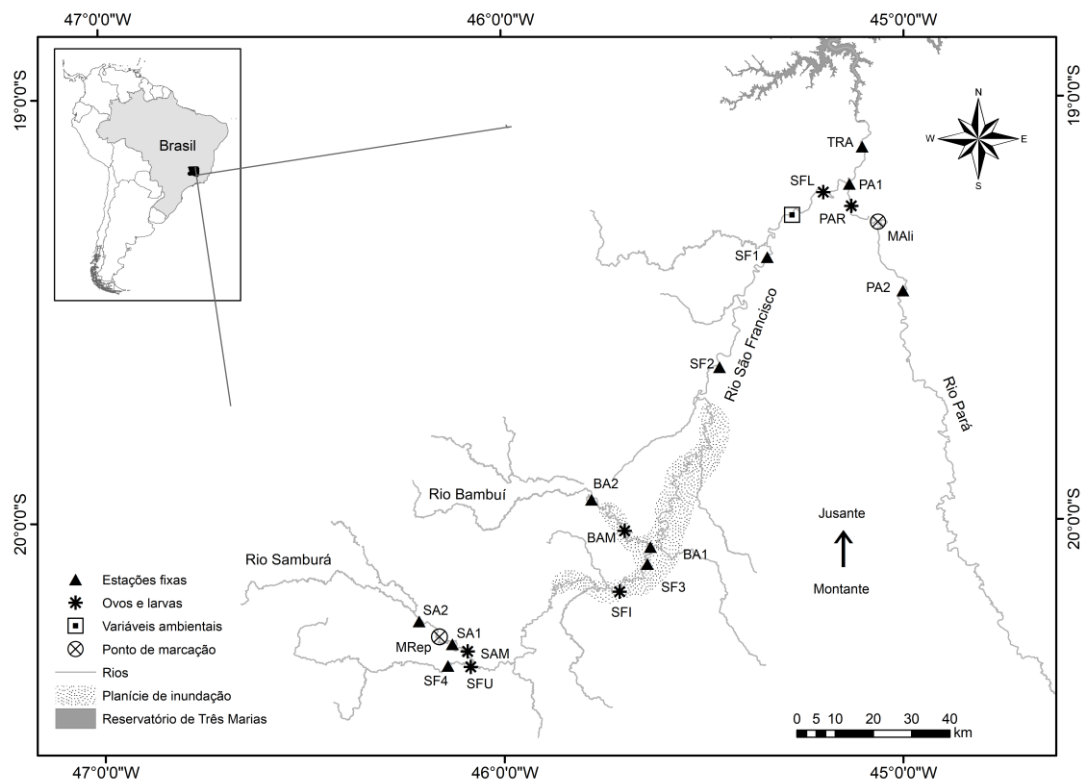
Onze estações fixas de telemetria foram implantadas em toda a área de estudo, incluindo desde a região superior do reservatório de Três Marias (TRA), a calha

principal do rio São Francisco (SF1, 2, 3 e 4), e os afluentes Pará (PA 1 e 2), Bambuí (BA 1 e 2), e Samburá (SAM 1 e 2), abrangendo aproximadamente 530 quilômetros lineares de canais dos rios acima citados (Figura 1). A primeira estação fixa em cada afluente foi posicionada o mais próximo possível de sua confluência com o rio São Francisco. As estações eram compostas por duas antenas com cinco elementos, uma direcionada a montante e outra a jusante, ambas a uma altura de 5-7 metros e conectadas a um receptor Lotek SRX-DL, cuja fonte de energia era uma bateria alimentada por uma placa solar.

Rastreamentos de barco foram realizados em novembro de 2019, agosto de 2020 e fevereiro de 2021, percorrendo os rios Pará e São Francisco, entre as estações fixas PA 2 e TRA, passando por PA1 durante o percurso, um trecho de aproximadamente 62 km que inclui o local de marcação do sítio de alimentação. Estes rastreamentos foram feitos com o intuito de identificar, entre os peixes que não foram detectados em estações fixas, quantos ainda permaneceram detectáveis e ativos. No entanto, não foi possível fazer o mesmo no ponto de marcação do sítio de reprodução, devido a presença de obstáculos intransponíveis pela embarcação. Nos rastreamentos embarcados, os peixes foram detectados com uma antena de três elementos conectada a um receptor Lotek SRX-600.

## **2.5 Amostragem de ovos e larvas**

Ovos e larvas foram amostrados em seis pontos distribuídos ao longo da área de estudo, três distribuídos na calha principal do rio São Francisco (superior, intermediário e inferior), e um nos rios Bambuí, Pará e Samburá próximo à confluência com o rio São Francisco (Figura 1). As amostragens foram realizadas por pescadores locais previamente treinados pela equipe de pesquisa, a cada três dias entre novembro de 2019 a fevereiro de 2020, abrangendo a maior parte do período reprodutivo dos peixes migratórios desta bacia (Bazzoli, 2003). As coletas foram realizadas no canal principal, entre 16:00 e 17:30 horas, utilizando-se uma rede de plâncton cônica de 500  $\mu$ m de malha, com medidor de vazão adaptado, para cálculo do volume filtrado. A rede foi submersa aproximadamente 20 cm de profundidade em água corrente por 10 min, e a temperatura da água foi medida a cada amostra.



**Fig. 1.** Locais de marcação no sítio de alimentação rio Pará (MPa) e no sítio de reprodução no rio Samburá (MSam), estação de amostragem de variáveis ambientais, planície de inundação, estações fixas de telemetria (TRA - transição do trecho lótico do rio São Francisco para o reservatório de Três Marias; PA1 - confluência do Pará com o rio São Francisco, 12 km a montante de TRA; PA2 - rio Pará 50 km a montante PA1 ; BA1 – rio Bambuí 1 km a montante da confluência com o rio São Francisco; BA2 – rio Bambuí 50 km a montante BA1; SA1 – rio Samburá 8 km a montante da confluência com o rio São Francisco; SA2 – rio Samburá 34 km a montante SA1; SF1 – Rio São Francisco 50 km a montante PA1; SF2 - Rio São Francisco 50 km a montante SF1; SF3 - Rio São Francisco 112 km a montante SF2; SF4 - Rio São Francisco 128 km a montante SF3), e pontos de amostragem de ovos e larvas (SFU, SFM, SFL, PAR, BAM e SAM).

## 2.6 Identificação por metabarcoding de DNA de ovos e larvas

Considerando os principais picos de densidade de ovos e larvas, amostras de todos os pontos foram escolhidas para identificação em nível de espécie usando *metabarcoding* de DNA, a partir do método *Illumina* de alto desempenho. O DNA foi extraído pelo método *Salting-out* adaptado (Aljanabi and Martinez 1997), quantificado em espectrofotômetro NanoDrop 2000 (Thermo Scientific), e normalizado para 100ng/μl. Um fragmento de 655pb da borda 5' do gene mitocondrial COI foi amplificado via PCR por uma combinação de diferentes primers (Fish F1 e FishR1), modificados a partir de sequências publicadas anteriormente. As sequências originais receberam uma cauda (pré-adaptador de iluminação) complementar ao adaptador utilizado na PCR subsequente. Essa reação foi realizada com água para monitorar a contaminação (controle negativo), além de um controle positivo. Em seguida, os

resultados da PCR foram purificados com esferas magnéticas (Agencourt AMPure XP® – Beckman Coulter).

Após a purificação, foi realizado um segundo PCR com os adaptadores do Nextera Index kit® (Illumina) para amplificar o conjunto de *amplicons* da etapa anterior. Nesta reação, adaptadores compatíveis com o sistema de sequenciamento Illumina de última geração (P5 e P7) foram usados como primers. Uma combinação de índice único (sequências específicas associadas ao adaptador Illumina) foi utilizada para posterior identificação de cada amostra, uma vez que todos os pontos formam um único conjunto de sequenciamento. O produto de amplificação foi avaliado em gel de agarose a 1,5%. As amostras foram consideradas amplificadas com sucesso no segundo PCR quando apresentaram o padrão de banda esperado para o fragmento COI (655bp COI + 60bp adaptador + 64bp índice = 780bp).

A ausência de contaminação nas amostras foi confirmada quando não foi observada amplificação para o controle negativo. Em sequência, os produtos de PCR foram novamente purificados com esferas magnéticas (Agencourt AMPure XP® – Beckman Coulter), quantificados em Nanodrop e normalizados para 20ng/μl. A solução obtida foi desnaturada e carregada no equipamento MiSeq® (Illumina), utilizando o kit de sequenciamento Miseq v3 300ciclos (2x150pb) com uma concentração final de 16 pM. Todas as amostras foram reunidas e purificadas com o kit ZymoClean™ Large Fragment DNA Recovery (Zymo Research), para remover fragmentos espúrios em relação ao tamanho de fragmento desejado (655pb COI + 60pb adaptador + 64pb índice = 780pb). Utilizando uma PCR em tempo real, realizada com o reagente KAPA Biosystems Quantification Kit (illumina), o *pool* foi quantificado, diluído até a concentração de 2nM e quantificado novamente, resultando na concentração final. A solução final foi desnaturada e carregada no equipamento MiSeq® (Illumina), utilizando o kit de sequenciamento Miseq v3 300cycles (2x150pb) com concentração de 16 pM.

## 2.7 Análise de dados

Os registros de telemetria foram validados de acordo com a sequência e a intensidade do sinal. Sequências com poucos sinais (<3) e/ou com apenas sinais de baixa intensidade (<100 em uma escala que varia de 0 a 255) foram descartados, pois havia alta probabilidade de serem causados por interferência externa no receptor. Uma sequência de sinais regulares com força crescente (geralmente > 150) detectada pela mesma estação fixa foi considerada um registro de presença de peixe válida. Registros detectados em intervalos de tempo menores que o intervalo entre emissões de dois

sinais pelas marcas (*burst rate*) também foram descartados. Procedimento semelhante foi utilizado para validar registros feitos por rastreamentos embarcados. O sensor de movimento dos transmissores mostra quando os peixes ficaram mais de 24h imóveis. O fator de condição de Fulton foi calculado para todos os peixes marcados utilizando a fórmula  $PC.CP^3 \cdot -1$ , na qual PC significa peso do corpo e CP significa comprimento padrão.

A normalidade dos dados foi avaliada visualmente a partir de histogramas e teste de Shapiro Wilk a partir dos resíduos. Uma vez que a distribuição fosse considerada normal, os dados foram analisados por modelos lineares (LM) e uma vez não normais, foram avaliados a partir de modelo linear generalizado (GLM) com distribuição Gamma ou Poisson dependendo da natureza da variável resposta, sempre no software R (R Core Team, 2022). Desse modo, possíveis diferenças de peso entre períodos de marcação foram avaliadas por um GLM Gamma em ambos os pontos de marcação e entre estes. Considerando peixes marcados no ponto de alimentação, foi avaliado se a distância migrada à montante era influenciada pelo ano de marcação, peso e fator de condição de Fulton por GLM. Por um LM foram avaliadas possíveis diferenças no fator de condição entre os anos de marcação e entre peixes que realizavam grandes migrações à montante (>100 km, Agostinho *et al.* 2003) ou peixes que permaneciam no sítio de alimentação, porém detectados em atividade de acordo com sensor de movimento. Considerando peixes marcados no seu sítio de reprodução, o fator de condição também foi comparado entre ano de marcação, mês de marcação e entre peixes que deixaram este sítio ou não, usando LM. Também por um LM, foi comparado o fator de condição entre os pontos de marcação.

O processamento dos dados obtidos por metabarcoding de ovos e larvas foram realizados utilizando o software R (pacote Phyloseq: McMurdie e Holmes, 2013) e o programa Cutadapt (Martin, 2011). As leituras obtidas no sequenciamento foram desmultiplexadas automaticamente pela plataforma Basespace (Illumina). Inicialmente, foi realizada a remoção das bases indeterminadas e a detecção, remoção das sequências correspondentes aos primers e remoção de reads com qualidade inferior a PHRED 20 (1 erro a cada 100 bp). A classificação foi realizada com sequências disponíveis em BOLD (<https://www.boldsystems.org/>), utilizando um classificador Bayesiano integrado no pacote DADA2 (Callahan *et al.*, 2016). Adicionalmente, as sequências de DNA (leituras) foram submetidas à pesquisa de similaridade com o banco de dados NCBI nr, utilizando a ferramenta BLASTn (Altschul *et al.*, 1990), com limiares de cobertura de sequência > 85% e identidade de sequência > 80%. As identificações foram selecionadas individualmente para cada amostra.

### 3. RESULTADOS

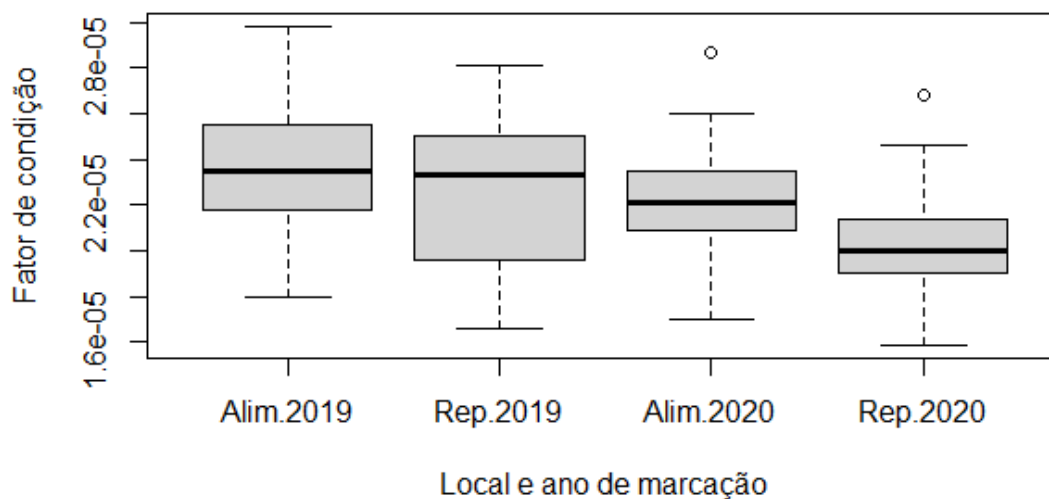
Cem peixes foram marcados no seu sítio de alimentação no rio Pará em 2019 e 2020. O peso destes peixes não variou entre os anos de marcação (GLM Gamma: desvio residual=7,47; graus de liberdade=98; AIC=1370,3;  $t=0,36$ ;  $p=0,72$ ) e a razão entre peso da marca e peso do peixe foi de 0,68 – 1,98%. No sítio de reprodução localizado no rio Samburá, 49 peixes foram marcados no mês de setembro e 51 foram marcados no mês de dezembro, ambos divididos entre os anos de 2019 e 2020. A razão entre peso da marca e peso dos peixes variando entre 0,57 e 2% e o peso destes peixes não variou nem entre meses (GLM Gamma: desvio residual=7,79; graus de liberdade=97;  $t=-1,58$ ;  $p=0,12$ ), nem entre anos ( $t=0,33$ ;  $p=0,74$ ) (Tab. 1). Porém, o peso dos peixes marcados no sítio de reprodução foi menor do que daqueles marcados no sítio de alimentação (GLM Gamma: desvio residual=15,51; graus de liberdade=198;  $t=2717,6$ ;  $p<0,01$ ). O fator de condição dos peixes marcados no sítio de desova não foi diferente entre os meses de setembro e dezembro (GLM Gamma: desvio residual=1,16; graus de liberdade=74; AIC=-1798,3;  $t=0,87$   $p=0,38$ ), ou entre peixes que deixaram o sítio de marcação ou não ( $t=-0,24$ ;  $p=0,81$ ), mas foi menor no ano de 2020 em ambos os meses ( $t=2,75$ ;  $p<0,01$ ). O fator de condição também foi menor no sítio de reprodução em relação ao sítio de alimentação quando considerado os dois anos de marcação (GLM Gamma: desvio residual=2,97; graus de liberdade=198; AIC=4557,6;  $p<0,01$ ) (Fig. 2).

**Tab. 1.** Número (N), comprimento padrão (média, mínimo, máximo e desvio padrão) e peso do corpo (média, mínimo, máximo e desvio padrão) dos peixes marcados por local de marcação e data.

Local marcação	Data	N	Comprimento padrão	Peso Corpo
Sítio Alimentação	03-20/09/2019	50	325,38 (276 -404 ± 31,87 cm)	824,13 (530 - 1400 ± 243,4 cm)
Sítio Alimentação	03/08 – 03/09/2020	50	334,37 (272-430 ± 34,47 cm)	844,12 (505 - 1475 ± 219,93 cm)
Sítio Reprodução	23 - 29/09/2019	25	325,92 (262-432 ± 41,89 cm)	793,65 (505 - 1750 ± 294,21 cm)
Sítio Reprodução	28/08 – 11/09/2020	25	333,2 (290-400 ± 28,62 cm)	754,2 (500 - 1430 ± 222,03 cm)
Sítio Reprodução	04-08/12/2019	26	314,48 (269-393 ± 33,42 cm)	698,15 (500 - 1265 ± 197,97 cm)



Sítio Reprodução	01- 04/12/2020	24	323,71 (289-394 ± 26,09 cm)	717,5 (500 - 1150 ± 177,98 cm)
---------------------	-------------------	----	--------------------------------	-----------------------------------



**Fig. 2.** *BoxPlot* do fator de condição de Fulton dos peixes marcados no seu sitio de alimentação no rio Pará (Alim) e no seu sitio de reprodução no rio Samburá (Rep), evidenciando menor valores em ambos os locais no ano de 2020, porém, com maior diferença para o ano de 2020 no sitio de reprodução.

### 3.1 Radiotelemetria: Sitio de alimentação

Entre os peixes marcados em 2019, 11 permaneceram ativos próximos ao local de marcação, 4 se deslocaram apenas até a confluência com o rio São Francisco ou proximidade e 15 (50%) realizaram grandes migrações à montante iniciadas entre 22 de setembro e 21 de novembro, resultando em uma janela migratória de 61 dias, tendo como destino diferentes trechos à montante. Entre os peixes marcados em 2020, 5 permaneceram ativos nas proximidades do local de marcação, 1 entrou no reservatório, 1 realizou migração à montante menor que 100km, 6 permaneceram próximos à confluência com o rio São Francisco e 13 (50%) realizaram grandes migrações à montante, que ocorreram entre 7 a 26 de outubro, totalizando uma janela migratória de 19 dias (Tab. 2). Vinte dos peixes marcados em 2019 e 24 marcados em 2020 ou foram detectados inativos ou nunca foram detectados (2 tiveram capturas reportadas por pescadores da região). A distância migrada não variou nem em relação ao peso (GLM Gamma:  $z=0,17$ ; desvio residual=17,5; graus de liberdade=36; AIC=522,9;  $p=0,86$ ) nem em relação ao ano ( $z=0,53$ ;  $p = 0,53$ ) ou fator de condição de Fulton ( $z=-0,36$ ;  $p = 0,72$ ). O fator de condição também não variou entre os anos de marcação (LM: erro

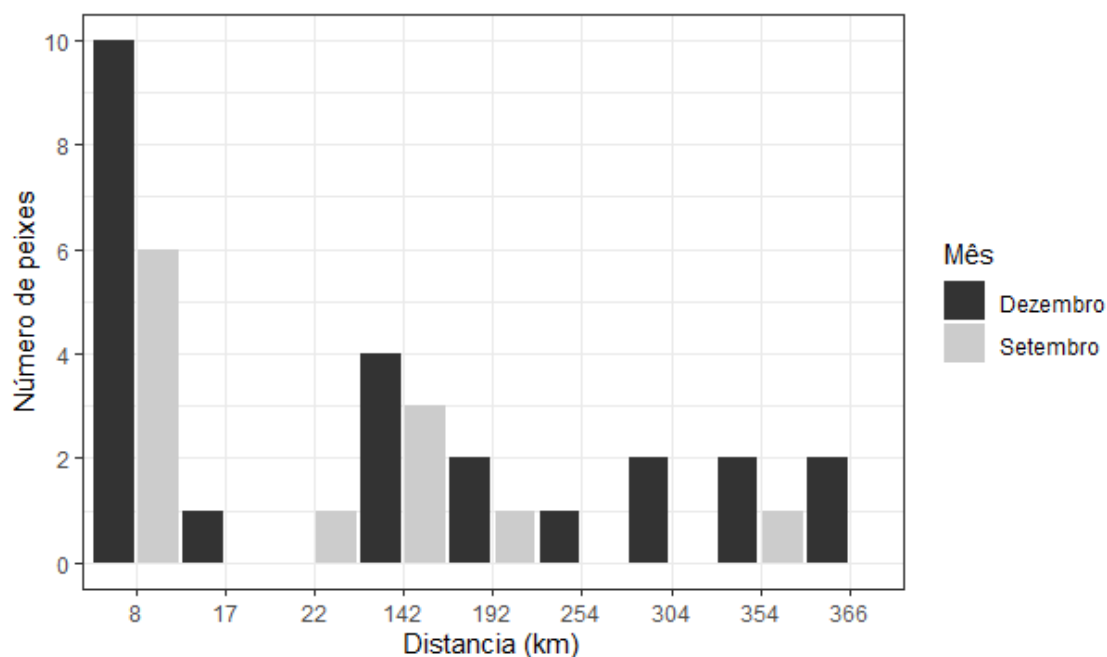
padrãoresidual=0,26;  $t=1,8$ ;  $p=0,08$ ), nem entre peixes que realizaram ou não grandes migrações (LM:  $t=-0,59$ ;  $p=0,56$ ).

**Tab. 2.** Número de indivíduos por destino alcançado, considerando peixes marcados no sítio de alimentação no rio Pará em 2019 e 2020 que realizaram grandes migrações (>100km) à montante. Os valores entre parênteses refletem a distância mínima alcançada a partir do sítio de marcação, considerando a última estação em que o peixe foi registrado.

Ano marcação	Rio de destino da migração			Total
	Bambuí	Samburá	São Francisco	
2019	<b>9</b> (280km)	<b>1</b> (362km)	<b>5</b> (228-355km)	<b>15</b>
2020	<b>8</b> (280km)	<b>4</b> (362-392km)	<b>1</b> (228km)	<b>13</b>

### 3.2 Radiotelemetria: Sítio de desova

Para peixes marcados no sítio de reprodução no mês de setembro de 2019, 2 tiveram capturas reportadas por pescadores da região e 12 (52,2%) deixaram o local de marcação com destinos variados por toda a bacia. Estes 12 peixes deixaram o sítio de marcação entre 29 de novembro de 2019 e 02 de março de 2020, mas 8 deles o fizeram em dezembro. Entre os peixes marcados em dezembro do mesmo ano, 19 (73,1%) deixaram o sítio de marcação entre 11 de dezembro de 2019 a 28 de março de 2020, tendo como destino praticamente todos os pontos da bacia monitorados (Fig. 3), sendo que um destes foi capturado por pescadores na planície de inundação do rio dos Patos, um pequeno afluente do rio São Francisco. Entre os peixes marcados em agosto/setembro de 2020, um foi capturado por pescadores e 5 (20,8%) deixaram o sítio de marcação entre 13 de setembro de 2019 a 27 de fevereiro de 2020. Entre peixes marcados em dezembro do mesmo ano, 13 (54,2%) deixaram o local de marcação entre 02 de dezembro de 2020 a 27 de março de 2021 (um deles o fez isoladamente em 08/08/2021), também tendo como destino praticamente todos os pontos da bacia (Fig. 4).



**Fig. 3.** Distâncias mínimas migradas por 49 peixes marcados no sitio de reprodução em setembro e dezembro de 2019 e 2020 e que realizaram deslocamentos registrados por estações fixas de monitoramento.

### 3.3 Fidelidade aos sítios de desova

Sete peixes forneceram informações em anos consecutivos, 2 deles marcados no sitio de alimentação e 5 no sitio de reprodução. Em seis desses casos (85,7%) houve visita ao mesmo sitio de reprodução em estações reprodutivas consecutivas. Em um caso (Peixe 4), o peixe retornou ao mesmo sitio de alimentação, no rio Pará, e ao mesmo sitio de reprodução por mais duas vezes, caracterizando três anos seguidos de visita ao mesmo sitio de reprodução, configurando fidelidade interanual tanto ao sitio de reprodução quanto ao sitio de alimentação. Em um caso (Peixe 7), o peixe permaneceu no sitio de reprodução por um ano e migrou no segundo ano (Fig. 4). Os peixes que foram detectados apenas em SA1 podem ter tido destinos variados uma vez que a próxima estação à jusante (SF3) está 134km distante.

### 3.4 Ovos e Larvas

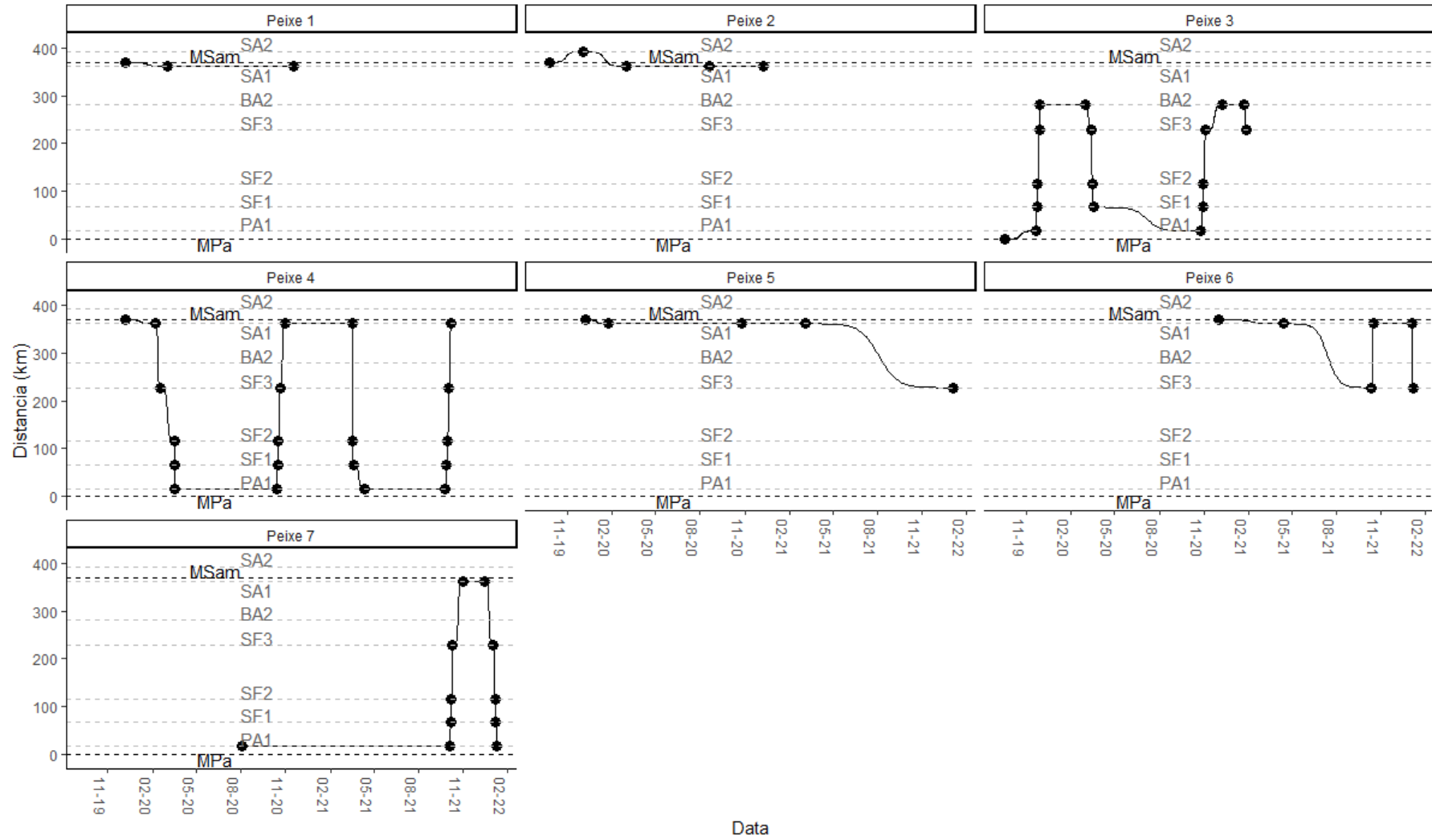
Foram realizadas 244 coletas de ovos e larvas nos seis pontos, sendo 41 em SFI, SFL, BAM, PAR e 40 em SFU e SAM, devido a uma forte cheia que impediu coleta nestes dois últimos pontos em 29/02/2020. Destas, 25 amostras de ovos e 8 de larvas foram selecionadas para identificação via *metabarcoding*. Considerando todos os 118 ovos identificados por metabarcoding, 67% foram amostrados nos pontos de amostragem mais a montante da bacia, 33% no ponto intermediário e nenhum nos

trechos mais à jusante. Quarenta e nove larvas foram identificadas no rio Bambuí e no ponto de amostragem situado próximo a confluência com o rio Pará (Tab. 3).

**Tab. 3.** Ovos (em negrito) e larvas da pioa *Prochilodus costatus* identificados por *metabarcoding*. Nome dos pontos de coleta de acordo com legenda da fig. 1.

Ponto	Data				
	04/12/2019	07/12/2019	16/12/2019	24/01/2020	30/01/2020
SAM	-	-	-	<b>33</b>	-
SFS	-	-	-	<b>46</b>	-
BAM	10	-	-	-	-
SFI	<b>39</b>	-	-	-	-
PAR	-	-	-	-	-
SFC	-	7	22	-	10

**Fig. 4.** Movimentações dos peixes com ao menos duas migrações reprodutivas registradas (Siglas como em Fig.1).



#### 4. DISCUSSÃO

Considerando que peixes marcados no sítio de reprodução tiveram como destino, após a estação reprodutiva, todos os trechos conectados da área de estudo, conclui-se que a população avaliada de *Prochilodus costatus* pode ter toda a bacia a montante do reservatório de Três Marias como sítio de alimentação, porém, peixes residentes em trechos a jusante apresentam maior tamanho. Aproximadamente metade dos peixes residentes nos sítios de alimentação migra anualmente, e dados de ovos e larvas indicam que majoritariamente apenas peixes presentes nos sítios de desova se reproduzem. Peso e fator de condição não foram fatores relevantes para a decisão de migrar. Peixes de todos os pontos da bacia utilizam os mesmos sítios de desova, localizados em trechos do rio principal ou em tributários, na altura da planície de inundação ou à montante dela. Tais peixes aparentemente apresentam grande fidelidade ao sítio de desova e ao sítio de alimentação e não existe uma distância migratória mínima para a espécie. Esta distância depende da localização do sítio de desova e do sítio de alimentação do indivíduo. A migração reprodutiva anual varia quanto ao início e término, podendo começar no fim de setembro ou início de outubro, mas é sempre desencadeada por alterações de fluxo causadas pelas primeiras chuvas do ano, podendo se restringir ao mês de outubro ou estender até dezembro.

As migrações tiveram início entre final do mês de setembro ou início do mês de outubro, dependendo do ano, resultado muito similar ao reportado por Lopes *et al.* (2018) para a mesma espécie no mesmo local. O mesmo estudo reporta também que o gatilho para início destas migrações são início das variações positivas de fluxo do rio quando o nível ainda é muito baixo, no fim da estação seca. Em vários casos, houve saída simultânea de 2 ou 3 peixes no mesmo dia, mas acabaram tendo destinos diferentes para sua migração, indicação de que o gatilho é o mesmo para peixes com diferentes locais de reprodução. Assim, além da preservação dos sítios de reprodução, conectividade e fiscalização da pesca nos sítios de desova durante o período reprodutivo, é essencial também manutenção das características de fluxo naturais que disparam a migração. Uma janela migratória concentrada no início da subida de nível dos rios evita maiores gastos energéticos ao enfrentar maiores fluxos na migração rio acima (Crozier *et al.*, 2008), ao mesmo tempo que garante mais tempo para crescimento das larvas e juvenis nas lagoas antes destas secarem, possibilitando maior sobrevivência ao recrutamento uma vez que os juvenis deixam as lagoas com tamanhos maiores (Lozano *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2020).

Além de ser destino de peixes de todas as partes da bacia, boa parte dos peixes marcados no ponto de reprodução no rio Samburá permaneceram no mesmo local, indicando

que são residentes neste ponto. Uma vez que, de acordo com dados de amostragem de ovos, apenas peixes presentes nestes sítios à montante desovam, pode ser considerado tentador residir no sítio de desova e não promover deslocamentos dispendiosos rio acima. No entanto, o fator de condição e peso foram menores nos peixes marcados no sítio de reprodução, mas não foram importantes nem na decisão de migrar e nem na distância migrada. Tal resultado indica que a oferta de recursos é maior nas partes mais baixas a ponto de não ser fator limitante para migrações. Embora o detrito, recurso alimentar desta espécie, seja abundante e fartamente distribuído em ecossistemas aquáticos (Bowen 2022; Araujo-Lima 1987), os trechos superiores utilizados como sítio de desova estão situados em locais de cabeceira onde os rio são menores, mais estreitos, e a velocidade da água é maior, enquanto os trechos a jusante são mais largos e possuem menor velocidade da água (Vannote *et al.* 1980), o que aumenta a quantidade de detrito disponível para espécies detritívoras. Como nesta espécie os machos são menores que as fêmeas (Bazzoli, 2003), seria esperado predominância de machos residentes no sítio de desova e o oposto no sítio de alimentação, mas nossos dados não permitem conclusões a esse respeito.

Todos os peixes que tiveram migrações registradas em anos consecutivos o fizeram para o mesmo local, fato que somada à já conhecida fidelidade da espécie ao sítio de alimentação (Lopes *et al.*, 2018), configura alta fidelidade da espécie aos seus sítios essenciais para completar o ciclo de vida. Este tipo de comportamento foi reportado para adultos de *P. argenteus* no rio São Francisco (Godinho & Kynard 2006) e *P. lineatus* na bacia do rio Paraná (Godoy 1975), sugerindo que pode ser amplamente disseminado dentro do gênero. No entanto, não sabemos se este local para onde sempre retornam é o mesmo onde nasceram, como no comportamento clássico reportado para o Salmão (Vespoor *et al.*, 2008). Este comportamento demanda atenção quanto à alteração ambiental já que aponta para dificuldades em encontrar rotas alternativas caso às originais sejam barradas ou alteradas. De fato, acumulação de peixes migradores por dias ou até meses no sopé de barramentos é um fenômeno bastante conhecido (Godinho & Loures, 2017). Conforme citado no parágrafo anterior, uma vez que tanto o local quanto o *timing* da desova são essenciais para sucesso do recrutamento, mesmo que estes peixes encontrem rotas alternativas ou sejam transpostos, o atraso causado pelo bloqueio ou pela negociação para entrada no sistema de transposição pode reduzir ou mesmo impedir o sucesso reprodutivo.

Quando a migração começa, aproximadamente metade da população migra e a outra permanece onde está. Aparentemente, a parte da população que não atinge sítios de reprodução não desova. Segundo Shaw & Levin (2013), muitas espécies podem se abster da

reprodução por anos consecutivos, e, embora nossos dados não permitem concluir quantos anos um mesmo indivíduo pode passar sem se reproduzir, verifica-se que metade da população não migra até os pontos de reprodução a cada ano. Como consequência, peixes que se alimentam longe dos sítios de desova devem decidir se migram ou não todos os anos. Alguns dos fatores conhecidos para esta decisão são o tamanho e a acumulação de reservas energéticas (Birnie-Gauvin *et al.*, 2021), mas em nosso caso, o fator de condição e o peso não foram importantes nem na decisão de migrar e nem na distância migrada. Segundo Redi & Chaput (2012), migrar em uma estação reprodutiva reduz as chances de migrar novamente em seguida, devido ao custo energético. No entanto, esse não parece ser um problema para indivíduos da espécie, uma vez que indivíduos foram registrados realizados migrações consecutivas por dois ou até mesmo três anos. Aparentemente, para *P. costatus*, a decisão de migrar depende de variáveis ambientais, especialmente *timing* de variações de fluxo, que indiquem menor custo da migração e maior sucesso no recrutamento, uma vez que alimento não seria um fator limitante.

No entanto, pouca atenção tem sido dispensada para como migradores parciais irão responder a alterações ambientais (Chapmann *et al.*, 2011). O regime hidrológico próprio de cada local, sendo que picos ou diminuições de fluxo variam regionalmente em frequência magnitude e os peixes são adaptados à estas variações específicas (Ficke *et al.*, 2007), e alterações nestas condições podem afetar a vida e ciclo dos peixes. No entanto, a mudança climática já afeta regimes de fluxo no mundo todo (Mauget 2003). Muitas espécies migratórias têm mostrado alterações fenológicas para se adaptar à estas mudanças climáticas (Arevalo *et al.*, 2021), no entanto, para peixes migratórios neotropicais, não há qualquer monitoramento contínuo anual para avaliar possíveis alterações. Nesse contexto, séries históricas avaliando momento e destino de migrações seriam essenciais para monitoramento de possíveis alterações climáticas. Alterações de fluxo causadas por barramentos e outras interferências antrópicas também podem ter graves consequências (Poff *et al.* 1997). Nesse contexto, em rios já barrados, Reid *et al.* (2018) propõem o método de manejo chamado por *e-flows*, no qual descargas são realizadas simulando as variações naturais de fluxo para restaurar características originais dos ecossistemas aquáticos.

Três usinas são planejadas para o trecho, que teriam impactos notáveis em ambos. No primeiro caso, da usina localizada na cidade de Pompeu abaixo da confluência com o rio Pará e na transição para o reservatório de Três Marias, o primeiro efeito mais óbvio seria o isolamento da população do reservatório de todos os seus sítios de reprodução à montante. Uma vez que há evidência de que não há reprodução no reservatório (Pereira Arantes *et al.*,



2011) e de que os peixes exibem fidelidade aos sítios de desova, o resultado poderia ser o colapso ou severos declínios populacionais. No caso da segunda usina, haveria, além do isolamento da população do reservatório dos seus sitio de reprodução à montante, isolaria também mais peixes do rio Pará de seus sítios, além de inundar e acabar com parte da planície de inundação que serve como berçário. No terceiro caso, além de isolamento de populações de jusante que se reproduzem no Samburá, isolaria os peixes dos trechos mais a montante dos melhores sítios de alimentação, o que poderia reduzir severamente o tamanho e condição dos peixes destes locais. Em todos os casos, a regulação do fluxo causada pela operação destas usinas poderia inibir tanto o início da migração reprodutiva, pela alteração dos gatilhos. Também em ambos os casos, dados sobre fidelidade espacial aos sítios essenciais indicam a priori pequena capacidade de adaptação às alterações ou de encontro de rotas migratórias. De fato, é marcante e amplamente relatado o declínio das populações de migradores após barramentos (Agostinho *et al.*, 2007).

Este manuscrito combina dados oriundos de diferentes técnicas para concluir que a população de *P. costatus* estudada pode ter toda a bacia como sitio de alimentação, mas é mantida pela reprodução que ocorre em poucos sítios de reprodução concentrados a montante. Por isso, seria relevante concentrar esforços de fiscalização nestes sítios durante o período reprodutivo, uma vez que neste período grande parte da população da bacia inteira está concentrada nestes pontos. A migração de peixes de todas as partes em direção a estes pontos de desova tem distancias que variam de acordo com o posicionamento do sitio de alimentação do peixe, e seu início está intimamente relacionado às flutuações naturais do ciclo hidrológico (Lopes *et al.* 2019a). A observação de que os peixes possuem fidelidade tanto ao sitio de reprodução quanto ao sitio de alimentação, além da dependência do ciclo hidrológico natural impõem dificuldade adicionais para medidas de manejo conhecidas, como sistemas de transposição e estocagem, uma vez que o ciclo de vida da espécie exhibe alta adaptação local dos indivíduos. Por exemplo, segundo Lopes *et al.* (2021) peixes da mesma espécie capturados a jusante da UHE Tres Marias e transpostos para o trecho lótico estudado neste manuscrito não foram capazes de utilizar pistas ambientais e realizar migrações espacialmente e temporalmente semelhantes à população local. Nesse sentido, a abordagem conservacionista deve ser focada na manutenção e de sítios essenciais (eg. Reprodução, crescimento e alimentação) e na manutenção ou simulação do regime hidrológico natural. Estudos recentes também têm mostrado que o comportamento migratório pode ser muito semelhante entre espécies do mesmo gênero (Peressin *et al.*, dados não publicados) ou mesmo de ordem e grupo trófico completamente diferentes (Hauser *et al.* 2020), sugerindo que os

resultados aqui apresentados podem se aplicar à outras espécies migradoras neotropicais. Finalmente, segundo Wikelski & Tertitski (2016), espécies migradoras podem ser sentinelas vivos das alterações ambientais e estudos recentes com salmões têm apontado migrações mais precoces relacionadas com o aquecimento (Legrand *et al.*, 2020; Otero *et al.*, 2014). Uma vez que espécies que não alteram sua fenologia em relação às mudanças ambientais estão em risco (Moller *et al.*, 2008), é essencial manter registros anuais contínuos sobre a migração de peixes de água doce neotropicais também, com intuito de monitorar alterações.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos diversos proprietários de terras da região que permitiram a pesca, instalação de estações fixas e monitoramento permanente das estruturas, em especial ao Sr. José Antônio de Vasconcelos e Marcio Antonio Lino (*in memoriam*). Também agradecemos a João Bosco dos Santos, José Concesso dos Santos e Cloves Martins Gonçalves pela pesca de todos os peixes marcados e a Marina Ferreira Moreira pelo auxílio com a figura 1 deste manuscrito. Este trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG nº 11548), via bolsa de doutorado do primeiro autor, da Companhia Energética de Minas Gerais (P&D CEMIG/ANEEL GT 612), e do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq Nº 303548/2017-7, bolsa de Paulo dos Santos Pompeu).

## REFERÊNCIAS

- Agostinho A.A., Gomes L. C., Suzuki H. I. & Julio-Junior H. F. (2003) Migratory fishes of the upper Parana river basin, Brazil. In: J. Carolsfeld, B. Harvey, C. Ross & A. Baer (eds) *Migratory Fishes of South America: biology, fisheries and conservation status* (pp. 19-98). Ottawa: IDRC:World Bank.
- Agostinho, A. A., Gomes, L. C., & Pelicice, F. M. (2007). *Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatórios do Brasil*. UEM.
- Aljanabi, S. M., Martinez, I. (1997) Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques. *Nucleic acids research*, **25**(22), 4692-4693.
- Altschul, S. F., Gish, W., Miller, W., Myers, E. W., & Lipman, D. J. (1990) Basic local alignment search tool. *Journal of Molecular Biology*, **215**(3), 403–410.
- Antonio, R. R., Agostinho, A. A., Pelicice, F. M., Bailly, D., Okada, E. K., & Dias, J. H. P. (2007). Blockage of migration routes by dam construction: can migratory fish find alternative routes?. *Neotropical Ichthyology*, **5**(2), 177-184.
- Araujo-Lima, C. A., Forsberg, B. R., Victoria, R., & Martinelli, L. (1986) Energy sources for detritivorous fishes in the Amazon. *Science*, **234**(4781), 1256-1258.

- Barthem, R. B., Goulding, M., Leite, R. G., Cañas, C., Forsberg, B., Venticinque, E., ... & Mercado, A. (2017). Goliath catfish spawning in the far western Amazon confirmed by the distribution of mature adults, drifting larvae and migrating juveniles. *Scientific reports*, 7(1), 1-13.
- Bazzoli, N. (2003) Parâmetros reprodutivos de peixes de interesse comercial na região de Pirapora. In: Godinho H.P. & Godinho A.L. (eds) *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais* (pp. 291–306). Belo Horizonte, MG: Pontifícia Universidade Católica
- Birnie-Gauvin, K., Bordeleau, X., Cooke, S. J., Davidsen, J. G., Eldøy, S. H., Eliason, E. J., ... & Aarestrup, K. (2021). Life-history strategies in salmonids: the role of physiology and its consequences. *Biological Reviews*, 96(5), 2304-2320.
- Bowen, S. H. (2022). The river flood pulse, benthic biofilm, and the nutrition of *Prochilodus lineatus*. *Environmental Biology of Fishes*, 1-18.
- Brönmark, C., Hulthén, K., Nilsson, P. A., Skov, C., Hansson, L. A., Brodersen, J., & Chapman, B. B. (2014). There and back again: migration in freshwater fishes. *Canadian Journal of Zoology*, 92(6), 467-479.
- Callahan, B. J., McMurdie, P. J., Rosen, M. J., Han, A. W., Johnson, A. J. A., & Holmes, S. P. (2016) DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature Methods*, 13(7), 581–583.
- Carolsfeld, J. (2003). *Migratory fishes of South America: biology, fisheries and conservation status*. Ottawa, Idrc: World Bank.
- Celestino, L. F., Sanz-Ronda, F. J., Miranda, L. E., Makrakis, M. C., Dias, J. H. P., & Makrakis, S. (2019). Bidirectional connectivity via fish ladders in a large Neotropical river. *River Research and Applications*, 35(3), 236-246.
- Cemig. 2006. *Usinas da Cemig: 1952-2005, a história da eletricidade em Minas e no Brasil*. Rio de Janeiro, RJ:Centro da Memória da Eletricidade no Brasil.
- Chapman, B. B., Brönmark, C., Nilsson, J. Å., & Hansson, L. A. (2011) The ecology and evolution of partial migration. *Oikos*, 120(12), 1764-1775.
- CODEVASF. 1991. *Inventário dos projetos de irrigação*. Brasília, DF:CODEVASF.
- Colborne, S. F., Sheppard, L. W., O'Donnell, D. R., Reuman, D. C., Walter, J. A., Singer, G. P., ... & Rypel, A. L. (2022). Intraspecific variation in migration timing of green sturgeon in the Sacramento River system. *Ecosphere*, 13(6), e4139.
- Crozier LG, Hendry AP, Lawson PW, Quinn TP, Mantua NJ, Battin J, Shaw RG, Huey RB. 2008 Potential responses to climate change in organisms with complex life histories: evolution and plasticity in Pacific salmon. *Evol. Appl.* 1, 252–270. (doi:10. 1111/j.1752-4571.2008.00033.x
- Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z. I., Knowler, D. J., Lévêque, C., ... & Sullivan, C. A. (2006). Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological reviews*, 81(2), 163-182.
- Dugan, P. J., Barlow, C., Agostinho, A. A., Baran, E., Cada, G. F., Chen, D., ... & Winemiller, K. O. (2010) Fish migration, dams, and loss of ecosystem services in the Mekong basin. *Ambio*, 39(4), 344-348.

- Dunn, P. O., & Winkler, D. W. (1999). Climate change has affected the breeding date of tree swallows throughout North America. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 266(1437), 2487-2490.
- Duponchelle, F., Isaac, V. J., Rodrigues Da Costa Doria, C., Van Damme, P. A., Herrera-R, G. A., Anderson, E. P., ... & Castello, L. (2021). Conservation of migratory fishes in the Amazon basin. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 31(5), 1087-1105.
- Duque, A. B., Taphorn, D. C., & Winemiller, K. O. (1998) Ecology of the coporo, *Prochilodus mariae* (Characiformes, Prochilodontidae), and status of annual migrations in western Venezuela. *Environmental Biology of Fishes*, 53(1), 33-46.
- Ficke, A. D., Myrick, C. A., & Hansen, L. J. (2007). Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 17(4), 581-613.
- Godinho, A. L., & Loures, R. C. (2017). Risk of fish death at Brazilian hydropower plants. *Risk Assessment of Fish Death at Hydropower Plants in Southeastern Brazil*. (Eds RC Loures and AL Godinho.) Vol, 1, 19-36.
- Godinho, A. L., & Kynard, B. (2006) Migration and spawning of radio-tagged zulega *Prochilodus argenteus* in a dammed Brazilian river. *Transactions of the American Fisheries Society*, 135(3), 811-824.
- Godoy, M. P. 1975. Peixes do Brasil (Fishes of Brazil). Franciscana Piracicaba, Brazil.
- Hauser, M., Duponchelle, F., Hermann, T. W., Limburg, K. E., Castello, L., Stewart, D. J., ... & Doria, C. R. (2020). Unmasking continental natal homing in goliath catfish from the upper Amazon. *Freshwater Biology*, 65(2), 325-336.
- Keefer, M. L., Moser, M. L., Boggs, C. T., Daigle, W. R., & Peery, C. A. (2009) Effects of body size and river environment on the upstream migration of adult Pacific lampreys. *North American Journal of Fisheries Management*, 29(5), 1214-1224.
- Legrand M et al. 2020 Diadromous fish modified timing of upstream migration over the last 30 years in France. *Freshw. Biol.* 66, 286–302. (doi:10.1111/ fw.13638)
- Lopes, J. D. M., Alves, C. B. M., Peressin, A., & Pompeu, P. S. (2021). Dazed and confused: Behavioural constraints impose major challenges to fish passage in the neotropics. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 31(12), 3403-3415.
- Lopes, J. D. M., Pompeu, P. S., Alves, C. B. M., Peressin, A., Prado, I. G., Suzuki, F. M., Facchin, S. & Kalapothakis, E. (2019a). The critical importance of an undammed river segment to the reproductive cycle of a migratory Neotropical fish. *Ecology of Freshwater Fish*, 28(2), 302-316.
- Lopes, J.M., Alves, C. B. M., Peressin, A. & Pompeu, P. S. (2018) Influence of rainfall, hydrological fluctuations, and lunar phase on spawning migration timing of the Neotropical fish *Prochilodus costatus*. *Hydrobiologia*, 818(1), 145-161.
- Lozano, I. E., Llamazares Vegh, S., Gómez, M. I., Piazza, Y. G., Salva, J. L., & Fuentes, C. M. (2019). Episodic recruitment of young *Prochilodus lineatus* (Valenciennes, 1836)(Characiformes: Prochilodontidae) during high discharge in a floodplain lake of the River Paraná, Argentina. *Fisheries Management and Ecology*, 26(3), 260-268.
- Martin, M. (2011) Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. *EMBnet.Journal*, 17(1), 10.

- Mauget SA (2003) Multidecadal regime shifts in US streamflow, precipitation, and temperatures at the end of the twentieth century. *J Clim* 16:3905–3916
- McCarty, J. P. (2001). Ecological consequences of recent climate change. *Conservation biology*, 15(2), 320-331.
- McMurdie, P. J. & Holmes, S. (2013) phyloseq: An R Package for Reproducible Interactive Analysis and Graphics of Microbiome Census Data. *PLoS ONE*, 8(4), e61217.
- MØLLER, Anders Pape; RUBOLINI, Diego; LEHIKONEN, Esa. Populations of migratory bird species that did not show a phenological response to climate change are declining. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 42, p. 16195-16200, 2008.
- O'Brien, G. C., Ross, M., Hanzen, C., Dlamini, V., Petersen, R., Diedericks, G. J., & Burnett, M. J. (2019) River connectivity and fish migration considerations in the management of multiple stressors in South Africa. *Marine and Freshwater Research*, 70(9), 1254-1264.
- Oliveira, A. G. D., Lopes, T. M., Angulo-Valencia, M. A., Dias, R. M., Suzuki, H. I., Costa, I. C. B., & Agostinho, A. A. (2020). Relationship of Freshwater Fish Recruitment With Distinct Reproductive Strategies and Flood Attributes: A Long-Term View in the Upper Paraná River Floodplain. *Frontiers in Environmental Science*, 192.
- Otero J et al. 2014 Basin-scale phenology and effects of climate variability on global timing of initial seaward migration of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Glob. Chang. Biol.* 20, 61–75. (doi:10.1111/gcb.12363) 32.
- Pelicice, F. M., Pompeu, P. S., & Agostinho, A. A. (2015). Large reservoirs as ecological barriers to downstream movements of Neotropical migratory fish. *Fish and Fisheries*, 16(4), 697-715.
- Pereira Arantes, F., Batista dos Santos, H., Rizzo, E., Sato, Y., & Bazzoli, N. (2011). Collapse of the reproductive process of two migratory fish (*Prochilodus argenteus* and *Prochilodus costatus*) in the Três Marias Reservoir, São Francisco River, Brazil. *Journal of Applied Ichthyology*, 27(3), 847-853.
- Peressin, A., Lopes, J. D. M., Bedore, A. G., Alves, C. B. M., Prado, I. G., & Pompeu, P. S. (2021). Radiotagging a long-distance migratory characid fish: reproduction after surgery, tag losses, and effects in weight. *Neotropical Ichthyology*, 19(2):e200097
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., ... & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769-784.
- R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. URL <https://www.R-project.org/>.
- Reid, A. J., Carlson, A. K., Creed, I. F., Eliason, E. J., Gell, P. A., Johnson, P. T., ... & Cooke, S. J. (2019). Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, 94(3), 849-873.
- Reid, J. E., & Chaput, G. (2012). Spawning history influence on fecundity, egg size, and egg survival of Atlantic salmon (*Salmo salar*) from the Miramichi River, New Brunswick, Canada. *ICES Journal of Marine Science*, 69(9), 1678-1685.
- Ros, A. E., Sverlij, S., Amestoy, F., & Spinetti, M. (1998) Migration pattern of the sábalo *Prochilodus lineatus* (Pisces, Prochilodontidae) tagged in the lower Uruguay

- River. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, **26**(5), 2234-2236.
- Sato, Y. & Godinho, H. (2003) Migratory Fishes of the São Francisco River. In: J. Carolsfeld, B. Harvey, C. Ross C & A. Baer (eds) *Migratory fishes of South America* (pp. 195-232). Ottawa, IDRC:World Bank.
- Sato, Y., Fenerich–Verani, N. & Godinho, H.P. (2003) Reprodução induzida de peixes da bacia do São Francisco. In: H.P.Godinho & A.L.Godinho (eds) *Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais* (pp. 277–290). Belo Horizonte, MG: Pontifícia Universidade Católica.
- Silva, E. A., & Stewart, D. J. (2017) Reproduction, feeding and migration patterns of *Prochilodus nigricans* (Characiformes: Prochilodontidae) in northeastern Ecuador. *Neotropical Ichthyology*, **15**.
- Silva, P. A., Vieira, G. G., Farinasso, M. I. G. U. E. L., & Carlos, R. J. (2003) Determinação da extensão do rio São Francisco. *XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 393-394.
- Menezes, N. A., & Vazzoler, A. E. A. D. M. (1992). Reproductive characteristics of Characiformes. In *Reproductive biology of South American vertebrates* (pp. 60-70). Springer, New York, NY.
- Vespoor E, Stradmeyer L, Nielsen JL. 2008 *The Atlantic salmon: genetics, conservation and management*. New York, NY: John Wiley
- Vu, A. V., Baumgartner, L. J., Mallen-Cooper, M., Doran, G. S., Limburg, K. E., Gillanders, B. M., ... & Cowx, I. G. (2022). Diverse migration tactics of fishes within the large tropical Mekong River system. *Fisheries Management and Ecology*.
- Wikelski, M., & Tertitski, G. (2016). Living sentinels for climate change effects. *Science*, *352*(6287), 775-776.