

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA

Avaliação da susceptibilidade ao barotrauma em duas espécies de peixes neotropicais, em função da descompressão induzida.

Marluce Aparecida Mattos de Paula Nogueira

São João del-Rei  
(2023)

Marluce Aparecida Mattos de Paula Nogueira

Avaliação da susceptibilidade ao barotrauma em duas espécies de peixes neotropicais, em função da descompressão induzida.

Orientador (a): Andrey Leonardo Fagundes de Castro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

São João del-Rei  
(2023)

Nome do (a) discente: Marluce Aparecida Mattos de Paula Nogueira

Título da dissertação: Avaliação da susceptibilidade ao barotrauma em duas espécies de peixes neotropicais, em função da descompressão induzida.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

Aprovado em: 05 de dezembro de 2023

Banca examinadora:

Prof. Dr. Andrey Leonardo Fagundes de Castro (Orientador)

Universidade Federal de São João del-Rei

Prof. Dr. Fernando Cesar Cascelli de Azevedo (Membro interno)

Universidade Federal de São João del-Rei


Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins da Silva (Membro externo)

Institute of Environmental Engineering.

Prof. Dr. Guilherme Souza (Membro externo)

Projeto Piabanha

Aos cinco dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e três, às 9 horas, na Universidade Federal de São João del - Rei, Campus Dom Bosco instalou-se a banca examinadora de dissertação de mestrado da aluna **Marluce Aparecida Mattos de Paula Nogueira**, via vídeo-conferência. A banca examinadora foi composta pelos professores Dr. Luiz Gustavo Martins da Silva, Institute of Environmental Engineering, ETH-Zürich, examinador externo, Dr. Guilherme Souza, Projeto Piabanha, examinador externo, Dr. Fernando Cesar Cascelli de Azevedo, UFSJ, examinador interno, e Dr. Andrey Leonardo Fagundes de Castro, UFSJ, orientador. Deu-se início a abertura dos trabalhos, por parte do professor Andrey Leonardo Fagundes de Castro, orientador, que, após apresentar os membros da banca examinadora e esclarecer a tramitação da defesa, solicitou a candidata que iniciasse a apresentação da dissertação, intitulada "**Avaliação da susceptibilidade ao barotrauma em duas espécies de peixes neotropicais**", marcando um tempo de 30 minutos para a apresentação. Concluída a exposição, o Prof. Andrey Leonardo Fagundes de Castro, presidente, passou a palavra ao examinador externo, professor Guilherme Souza, para arguir a candidata, e, em seguida, para o professor Luiz Gustavo Martins da Silva, para também arguir a candidata, e, por último ao examinador interno, professor Fernando Cesar Cascelli de Azevedo, para que fizessem o mesmo. Na sequência o prof. Andrey fez algumas considerações finais. Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, a candidata foi **APROVADA** conforme as normas vigentes na Universidade Federal de São João del-Rei. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa no prazo de 30 (trinta) dias, a contar a partir da data de defesa, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa, conforme o artigo 97 da Resolução CONEP Nº 001, de 15 de março de 2023. A candidata não terá o título se não cumprir as exigências acima descritas.

Documento assinado digitalmente  
 LUIZ GUSTAVO MARTINS DA SILVA  
Data: 08/02/2024 05:18:46-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>


**Dr. LUIZ GUSTAVO MARTINS DA SILVA**

Examinador Externo à Instituição


Documento assinado digitalmente  
 GUILHERME SOUZA  
Data: 08/02/2024 11:47:08-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Dr. GUILHERME SOUZA**


Examinador Externo à Instituição

Documento assinado digitalmente  
 **FERNANDO CESAR CASCELLI DE AZEVEDO**  
Data: 08/02/2024 16:35:06-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Dr. FERNANDO CESARCASCELLI DE AZEVEDO, UFSJ**  
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente  
 **ANDREY LEONARDO FAGUNDES DE CASTRO**  
Data: 07/02/2024 14:52:10-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**Dr. ANDREY LEONARDO FAGUNDES  
DE CASTRO, UFSJ** Presidente

Documento assinado digitalmente  
 **MARLUCE APARECIDA MATTOS DE PAULA NOGUEIRA**  
Data: 28/02/2024 06:08:22-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

**MARLUCE APARECIDA MATTOS DE  
PAULA NOGUEIRA** Mestranda

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N778a Nogueira, Marluce Aparecida Mattos de Paula.  
Avaliação da susceptibilidade ao barotrauma em  
duas espécies de peixes neotropicais, em função da  
descompressão induzida. / Marluce Aparecida Mattos  
de Paula Nogueira ; orientador Andrey Leonardo  
Fagundes de Castro Castro. -- São João del-Rei, 2023.  
62 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em  
Ecologia) -- Universidade Federal de São João del  
Rei, 2023.

1. Barotrauma. 2. Hidrelétricas. 3. Variação de  
pressão. 4. Câmara hipo-hiperbarica. I. Castro,  
Andrey Leonardo Fagundes de Castro, orient. II.  
Título.

Financiamentos:



AP 23088.012191/2023-30

*\* Esse estudo foi parcialmente financiado por recursos do projeto intitulado “Quantificando letalidade e comportamento de peixes expostos a supersaturação gasosa em rios sob influência de usinas hidrelétricas - AP 23088.012191/2023-30”, parceria firmada entre a UFSJ, UNIFEI e Sinop Energia (bolsa de mestrado de set a dezembro de 2023).*

Apoio e colaborações:



PROJETO   
PIABANHA



Universidade Federal  
de São João del-Rei



Laboratório de Ecologia  
Molecular e Ictiologia

**Agradecimentos**

Minha Gratidão....

... ao Criador pela minha existência e por cada experiência vivida até hoje. Acima de tudo por toda fé, por colocar sonhos em meu coração e esse foi um deles (mestrado).

...aos meus pais, por todo amor e apoio, meu pai Jair Nogueira de Paula (in memoriam) quanta saudade! A minha mãezinha Eva Mattos de Paula que sempre investiu nos estudos. Aos meus irmãos, Marcio e Marco Aurélio, meus sobrinhos e afilhados, Yuri e Juan Marcus, e a minha cunhada Valmira.

... em especial ao meu esposo Cássio por escolher estar ao meu lado, por me apoiar e compreender minha ausência durante esse período, por transportar meus peixinhos.... obrigada por fazer parte da minha vida.

.... a minha rede de apoio chamada “Amigos”, por cada palavra de incentivo, apoio, abraço e por aguentarem minha risada discreta rrsr (contém ironia).

... a minhas colegas, amigas e irmãs de apartamento, Santuza e Elaine. De república, Ana Paula, Quézia, Jacqueline e Franciela. Obrigada pela convivência, pelo carinho e cuidado todos esses meses.

... ao LEMI (Laboratório de Ecologia Molecular e Ictiologia) e todos fizeram ou fazem parte dele, por cada mão de apoio e que ajudava a cuidar dos meus peixinhos, bem como autopsiá-los, ou simplesmente passava por lá para um café...Higor, Arthur, Breno, Kessin, Sarah, Nathalia, Gabriele, Jonhny Pierre, Ana Carolina, Jader, Géssica, Jessica, Fernando, Isabela (Bela).

... aos colegas e amigos da turma de 2021 e 2022, em especial ao Júlio Cesar e a Thayná, por toda ajuda nessa etapa.

.... a UFSJ e ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, todos os docentes e colaboradores, em especial a Magda por atender sempre solicita as perguntas encaminhadas.

... a Fapemig e ao Projeto “Quantificando letalidade e comportamento de peixes expostos a supersaturação gasosa em rios sob influência de usinas hidrelétricas”, pela concessão da bolsa que permitiu dar seguimento no meu projeto.

... a SINOP no projeto intitulado “Quantificando letalidade e comportamento de peixes expostos a supersaturação gasosa em rios sob influência de usinas hidrelétricas - AP 23088.012191/2023-30”, parceria firmada entre a UFSJ, UNIFEI e Sinop Energia pela bolsa de mestrado concedida entre de set e dezembro de 2023.



... ao Projeto Piabanha pela parceria com a doação das espécies estudadas, e em especial ao Dr. Guilherme de Souza que acreditou em minha capacidade antes do ingresso no mestrado e me apoia até hoje.

... ao Dr. Luiz Gustavo Martins da Silva por aceitar integrar minha banca, por sua importante contribuição, bem como inspiração em aprender mais sobre o projeto desenvolvido, o qual já faz parte dos meus objetivos futuros.

... ao Dr. Fernando Cesar Cascelli de Azevedo por aceitar fazer parte da minha banca e por exercer uma diferença muito significativa em nossas vidas.

... aos professores Dr.<sup>a</sup> Gislene de Casto e Dr. Carlos Martinez por aceitarem ser os suplentes da banca, especial agradecimento.

... aos pesquisadores e professores que são inspiração para seguir a carreira acadêmica e me ajudaram a ver o quanto posso realizar fazendo pesquisas, Fernando M. Pelicice, Erick Cristofore, Pâmella Brito, Ana Clara Franco, Jean Vitule, Tiago C. Pessali, Ricardo C. Castro, Telton Ramos, Paulo Pompeu, entre outros.

... Ao meu orientador, Andrey por cada palavra, por cada conselho, por cada orientação e por acreditar que eu seria capaz de realizar esse projeto. E por me instigar a saber mais, conhecer mais sobre esse assunto tão importante para a nossa ictiofauna.

Grata!

***“tenho em mim todos os sonhos do mundo...”*** *Fernando Pessoa*

## **Sumário**

Resumo.....	11
Abstract.....	12
Introdução.....	13
Metodologia.....	19
Resultados.....	27
Discussão.....	51
Conclusão.....	54
Referências Bibliográficas.....	54

## Resumo

A ictiofauna neotropical vem enfrentando ameaças devido à construção de barragens e reservatórios, responsáveis por fragmentar rios e impedir o movimento de migração de espécies de peixes. A proximidade das espécies ao redor das hidrelétricas, leva ao contato destas com as estruturas do empreendimento, ocasionando lesões e/ou a morte, por choques mecânicos, pela turbulência na água, por forças de cisalhamento, pela cavitação, pela supersaturação de gases e por variações de pressão. Estudos vem sendo realizados, com diferentes espécies de peixes e o contato com as estruturas das usinas, para entender as consequências das variações rápidas de pressão. As quais sejam lesões (hemorragia, exoftalmia, embolia, ruptura da bexiga natatória), mudanças de comportamento, bem como a morte. Em câmaras hipo-hiperbáricas que simulam as variações de pressão, semelhante àquelas encontradas pelos peixes ao passar por uma turbina em uma hidrelétrica, em que são realizados os experimentos, para avaliar a incidência ao barotrauma. O presente estudo analisou em *Astyanax cf. bimaculatus* e *Prochilodus vimboides*, a relação entre diferentes razões e taxas de descompressão na ocorrência de injúrias (lesões), assim como avaliou a taxa de sobrevivência 120 horas após a descompressão, em *A. cf. bimaculatus*. As duas espécies estudadas são peixes Neotropicais, que pertencem a ordem Characiformes. Em laboratório foram realizados 83 experimentos, com três modelos de experimento, totalizando 720 peixes submetidos a diferentes pressões e rapidamente descomprimidos. Sendo estes peixes autopsiados para a identificação de lesões, tanto em *A. cf. bimaculatus* quanto em *P. vimboides*. Os dados da frequência média de indivíduos com injúrias foram analisados e a relação da razão de descompressão das pressões trabalhadas. Através do teste de Kruskal-Wallis observou uma diferença significativa entre razão de descompressão do grupo controle em função das demais razões. Nas taxas de descompressão não houve diferenças significativas e os indivíduos levados à observação sobreviveram às 120 horas. A incidência de lesão foi observada em 90% dos animais, dentre as observadas foram: hemorragia, embolia, trauma, ruptura de bexiga, exoftalmia e vasos hipertrofiados. O resultado demonstrou que as espécies são susceptíveis as lesões, mas o quanto são capazes de sobreviver as demais adversidades encontradas no ambiente e como eles respondem fisiologicamente as lesões são outros fatores que ainda precisamos saber mais.

**Palavras-chave:** barotrauma, hidrelétricas, variação de pressão, câmara hipo-hiperbarica

## Abstract

Neotropical fish fauna has been facing threats due to the construction of dams and reservoirs, which are responsible for fragmenting rivers and preventing the migration of fish species. The proximity of fish to hydroelectric powerplants can result in interactions with its structures, causing injuries and/or death, due to mechanical shocks, turbulence in the water, shear forces, cavitation, gas supersaturation and pressure variations. Rapid decrease in pressure is known to causes injuries to fish due to rapid changes in the volume of the gas bladder and/or the decrease gas solubility in the fish blood streams. These injuries are known as barotrauma, and are consisted of bleeding, exophthalmia, embolism, rupture of the swim bladder, resulting in serious changes in behavior, or even death. Studies have been carried out to understand the consequences of rapid pressure variations in different fish species, by simulating in laboratory pressure variations similar to those encountered by fish when passing through a hydropower turbine. The present study evaluated the incidence of barotrauma in different decompression scenarios (both different rates and ratio of decompression) for two Neotropical fish species, *Astyanax cf. bimaculatus* and *Prochilodus vimboides* (Order Characiformes). It was also evaluated the survival rate of *A. cf. bimaculatus* after 120 hours following the decompression at different ratio. A total of 83 experiments were carried out, with three experimental models, totaling 720 fish. Data on the average frequency of individuals with injuries were analyzed and the relationship between the decompression ratio and the pressures worked. Using the Kruskal-Wallis test, a significant difference was observed between the decompression ratio of the control group as a function of the other ratios. There were no significant differences in the two decompression rates and the individuals taken for observation survived 120 hours. The incidence of injury was observed in 90% of the animals, among those observed were: hemorrhage, embolism, trauma, bladder rupture, exophthalmos and hypertrophied vessels. The result demonstrated that the species are susceptible to injuries, but the extent to which they are able to survive other adversities found in the environment and how they physiologically respond to injuries are other factors that we still need to know more about.

Keywords: barotrauma, hydroelectric plants, pressure variation, hypohyperbaric chamber

## **Avaliação da susceptibilidade ao barotrauma em duas espécies de peixes neotropicais, em função da descompressão induzida.**

### **1. INTRODUÇÃO**

São 35.500 espécies de peixes consideradas válidas (Fricke *et al.* 2020), distribuídas em 85 ordens e 536 famílias (Nelson *et al.* 2016). Destas espécies, 43% são predominantemente de água doce (Nelson *et al.* 2016) bem como, cerca de 8.000 espécies são encontradas na região Neotropical (Graça & Pavanelli, 2007), das quais 2.600 são encontradas em território brasileiro (Buckup *et al.* 2007).

A região Neotropical região possui uma das maiores redes hidrográficas do planeta (Helfman *et al.*, 2009; Nelson *et al.*, 2016; Toussaint *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2021), porém seus rios estão ameaçados por múltiplos estressores antropogênicos (Sales *et al.*, 2018; Ríos-Touma e Ramirez, 2019). Entre os estressores estão os empreendimentos hidrelétricos, que acarretam impactos desde sua construção até a sua operação (Agostinho *et al.*, 1999; Barletta *et al.*, 2010; Pinto *et al.*, 2019).

As consequências dos empreendimentos são incalculáveis, modificam os rios, alteram o entorno destes e impactam toda a estrutura das comunidades aquáticas (Agostinho *et al.*, 2007). Os impactos podem ser diretos ou indiretos, e afetar todas as fases de vida de um peixe (Agostinho *et al.*, 2007; Magalhães, 2009; Baumgartner *et al.*, 2014; Boys *et al.*, 2014; Aquino, 2016; Stockler, 2016).

Em torno de 12% das reservas mundiais de água, estão presentes no território brasileiro (Pelicice *et al.*, 2017; ANA, 2019). São 12 bacias hidrográficas, com um grande volume de água que confere aos reservatórios brasileiros destaque pela produção de energia, atingindo um total de 67% da energia gerada no país (ANEEL, 2021). De acordo com dados da ANEEL (2021) são 739 centrais geradoras hidrelétricas em operação - CGH (empreendimentos com o potencial de gerar até 5 megawatts de energia), 425 pequenas centrais hidrelétricas- PCH (usinas hidrelétricas de tamanho e potência relativamente reduzidos, entre 5 e 50 megawatts de potência e devem ter menos de 13 km<sup>2</sup> de área de reservatório) e 219 usinas hidrelétricas- UHE (usinas de grande porte com capacidade de produzir mais de 30 megawatts por hora operando em capacidade máxima e devem ter mais de 13 km<sup>2</sup> em área total de reservatório).

Assim como as grandes usinas hidrelétricas (Stanley *et al.*, 2002; Hayes *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2010), os empreendimentos de pequeno e médio porte também geram impactos ambientais (Zeleňáková *et al.*, 2018). Acarretam modificações na ictiofauna desde abundância, tamanho, peso e composição das espécies (Benejam *et al.*, 2016); interrompem o fluxo dos peixes (Bakken *et al.*, 2012) e conseqüente reduzem as espécies migratórias (Arcifa & Esguý'cero, 2012; Bakken *et al.*, 2012). Independentemente do tamanho, há degradação ecológica (Zarfl *et al.*, 2015)

Neste cenário, têm sido observados eventos frequente de mortalidade de peixes, resultantes de operação em usinas (registrado em toneladas de peixes mortos) no país (Andrade *et al.*, 2012; Silva *et al.* 2019). Em parte, isso se deve ao fato de que a descarga de água dessas estruturas atrai populações de peixes para o eixo da barragem, estando susceptíveis a interações com as estruturas das usinas, em especial vertedouros e turbinas (Agostinho *et al.*, 2007; Magalhães, 2009; Silva, 2010; Andrade *et al.*, 2012).

As turbinas são máquinas que transformam a energia potencial hidráulica em energia mecânica (Lopes, 2011). São produzidas para atender determinadas características de queda e vazão, geralmente existem dois tipos de turbinas: (i) ação: toda energia hidráulica é convertida em cinética- o rotor opera fora da água (pressão atmosférica), empregadas em quedas muito altas (Pelton); (ii) reação: rotores trabalham dentro da água sob pressão. Parte da energia hidráulica é convertida em cinética, ou seja, ocorre a ação de impulso devido à alteração da direção da água e da reação provocada pela queda de pressão (Francis, Kaplan e Bulbo) (Pereira, 2015).

As turbinas Pelton são recomendadas para quedas elevadas, a água é transportada para a tubulação, que possui um bico no final, um tipo de gargalo que aumenta a velocidade da água direcionada. O jato de água que sai pelo bico atinge as pás do impulsor, que têm formato de côncavo. Essas turbinas são empregadas em usinas de grande potência, bem como em micro usinas, aproveitando quedas e vazões bem pequenas para geração de algumas dezenas de kW (RAMOS, 2009).

As turbinas Francis, devido as características hidrológicas do Brasil é o modelo mais utilizado. Essas turbinas alcançam as maiores potências de eixo e são utilizadas em uma ampla faixa de alturas de queda líquida, que compreende desde pequenas alturas como por exemplo 10m até 450m. É uma turbina de fluxo centrípeto: a água atinge o impulsor por meio de um duto em espiral, e as hélices ajustáveis na parte fixa direcionam o fluxo para as hélices do impulsor (Bergamo, 2018).

As turbinas Kaplan, possuem hélice com pás ajustáveis, e são utilizadas na mesma faixa de altura das turbinas Francis, nos quais uma velocidade mais elevada seja necessária, preferencialmente em relativas baixas alturas topográficas e grande vazão de água. É uma turbina do tipo axial (que tem forma de eixo): o fluxo de água com que faz as hélices girem em direção axial em relação ao eixo de rotação do impulsor (Bergamo, 2018).

As turbinas tipo bulbo são semelhantes as Kaplan, todavia trata-se de máquinas de eixo horizontal são empregadas para usinas de baixíssima queda, na qual todos os equipamentos ficam totalmente submersos pela água captada pela tomada d'água. Esta água flui ao redor do gerador encapsulado, e mais à frente atinge as hélices da turbina que faz rodar o conjunto (Bergamo, 2018).

No Brasil, apenas 3 usinas funcionam com turbinas Pelton, o que corresponde a 1,6%; 70 usinas utilizam a Kaplan, o que configura 38%, enquanto 111 usinas operam com Francis, totalizando 60% (Ecotx, 2023). Estudos vem sendo realizados com as turbinas do tipo Fish Friendly, com objetivo de proporcionar mais segurança à passagem dos peixes (Cada, 1997, 2001).

A passagem pelas turbinas tem se mostrado como de grande risco para peixes, seja pelo contato com suas estruturas, seja pela rápida mudança de pressão (descompressão) (Brown, 2023). A descompressão lesões ou mortalidade para várias espécies de peixes (Brown *et al.*, 2012a; Pflugrath *et al.*, 2018, 2020) e afeta a todos aqueles que passam por uma turbina, independentemente do tamanho dos peixes, podendo ocorrer tanto a jusante quanto a montante da barragem (Brown *et al.*, 2014; Beirão *et al.*, 2018).

Estudos apontam que após eventos de paradas/retomada de máquinas é comum encontrar peixes mortos no canal de fuga de usinas hidrelétricas (Agostinho *et al.*, 2007; Silva, 2010; Andrade *et al.*, 2012; Loures & Pompeu, 2012), com lesões causadas pela variação de pressão (Brown *et al.*, 2014; Boys *et al.*, 2014). Estas podem ser internas e externas, as quais sejam embolias, hemorragia (nas brânquias, nos olhos, nas nadadeiras, no coração, no fígado), o rompimento da bexiga natatória, a exoftalmia, a eversão (da bexiga natatória, das gônadas e do intestino) (Brown *et al.*, 2012b).

As lesões (barotraumas), vem se tornando uma preocupação recorrente (Brown *et al.*, 2014). Os primeiros dados com foco do barotrauma induzido pela estrutura hidráulica concentraram-se em espécies de salmonídeos, na América do Norte (Brown *et al.*, 2012; b; Pflugrath *et al.*, 2012). Desde então, diferentes espécies de peixes e demais estruturas das usinas estão sendo continuamente examinadas quanto ao risco das variações rápidas



de pressão (Colotelo *et al.*, 2012; Brown *et al.*, 2013; Boys *et al.*, 2016; Fu *et al.*, 2016; Pflugrath *et al.*, 2018; Boys *et al.*, 2018; Beirão *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2018, Kerr *et al.*, 2023).

Os estudos com câmara hipo-hiperbárica simulam variações de pressão, semelhante àquelas sofridas pelos peixes, quando passam pela turbina. Desta maneira é possível avaliar a incidência de barotrauma, bem como entender melhor a resposta dos peixes. E com essas informações criar um banco de dados, descrevendo os limites de decompressão suportados, a frequência de ocorrência, número de peixes afetados, tipo e grau de injúrias, bem como a sobrevivência das espécies após a decompressão. Além disso, é possível comparar grupos de peixes com características específicas (e.g. fisóstomos vs. fisoclistos; bexiga gasosa simples vs. bexigas natatórias multicâmaras; dentre outras).

Beirão (2015), Soares (2016) e Marques (2017) apresentaram os primeiros resultados relacionados aos efeitos da rápida decompressão sobre espécies de peixes neotropicais através da simulação em laboratório, tendo sido estudadas as espécies *Pimelodus pictus*, *Geophagus brasiliensis* e *Astyanax lacustres*, respectivamente. Nesses estudos, peixes foram pressurizados à diferentes pressões por tempo suficiente até atingirem o equilíbrio hidrostático (flutuabilidade neutra), sendo então descomprimidos rapidamente. De modo geral, tais estudos mostraram uma considerável susceptibilidade das espécies à rápidas variações de pressão com incidências de diferentes tipos de barotrauma, além da morte de peixes como resultado das decompressões. Já Aquino (2016) apresenta importantes contribuições analisando histologicamente a bexiga natatória de espécies de peixes das ordens Perciformes e Characiformes a fim de prover dados para melhor compreensão dos efeitos da decompressão em peixes.

Variáveis como a pressão em que os peixes são aclimatados, a amplitude da variação da pressão e a velocidade da decompressão são importantes, pois podem aumentar a probabilidade de ocorrência de lesões nos peixes (Rummer & Bennet, 2005; Brown *et al.*, 2009, 2015; Beirão, 2015). A razão de decompressão é a relação entre a pressão em que um peixe está aclimatado (em flutuabilidade neutra) e a menor pressão (pressão nadir) durante percurso na máquina. (Cramer & Oligher, 1964; Beyer *et al.*, 1976; Brown *et al.*, 2009; 2015). Ela é uma das métricas avaliadas para compreender o barotrauma (Trumbo, 2014). Estudos demonstram que maiores razões de decompressão levam a uma maior incidência de lesões mortais, uma vez que resultam em uma maior expansão da bexiga gasosa ou mesmo sua ruptura (Brown *et al.*, 2012b). De acordo com

o estudo realizado por Marques (2017), a razão de descompressão foi a principal variável a influenciar a ocorrência de lesões, hemorragia e embolias apresentaram a frequência de ocorrência superior a 75%.

Outra variável importante é a velocidade da descompressão (a velocidade em que ocorrerá a variação da pressão de aclimatação até a pressão nadir- menor pressão atingida) (Brown et al., 2012a). De acordo com Brown *et al.* (2012a) que realizaram experimentos onde descomprimiram lentamente juvenis de salmão (entre 2,2 - 2,4 min) a pressões muito baixas. Por se tratar de peixes fisóstomos, os autores observaram que eles são capazes de expulsar o gás da bexiga natatória em expansão, não sendo observadas mortes ou lesões. Por outro lado, quando os peixes foram descomprimidos rapidamente, a mortalidade foi superior a 80%. E mesmo aclimatado a altas pressões, a probabilidade de ocorrência de lesões tende a ser pequena quando da descompressão lenta (Stephenson et al., 2010; Brown et al., 2012b; Beirão, 2015).

Além da incidência de lesões e dos registros de mortalidade imediata avaliados em muitos dos estudos sobre barotrauma, ainda pouco se sabe sobre os efeitos das lesões à longo prazo. Magalhães (2009) observou os peixes por um período de 96h após a descompressão, identificando alguma melhora das lesões e aumento da ocorrência de fungos, provavelmente em razão do estresse causado. Portanto, se a lesão não é severa suficiente para levar a uma morte instantânea, pode haver uma capacidade de recuperar e absorver lesões (Pflugrath, 2018).

Nesse sentido, o presente estudo, analisou a relação entre as razões e taxas de descompressão e a ocorrência de injúrias (lesões), bem como diferentes taxas de descompressão (rápida e mais lenta) e a sobrevivência 120 horas após a descompressão. Foram utilizadas duas espécies de peixes neotropicais (da região que é composta pela América do Sul e Central, bem como pelo México), estas espécies pertencem a ordem Characiformes, sendo uma das maiores e mais diversas ordens de peixes de água doce do mundo.

As espécies aqui estudadas foram selecionadas em função: de suas características ecológicas, das interações com as estruturas de usinas hidrelétricas, para complementar estudo anteriores (*Astyanax cf. bimaculatus*), bem como a disponibilidade de espécimes. As espécies pertencem a ordem Characiformes, são elas: *Astyanax cf. bimaculatus* (Lambari) e *Prochilodus vimbóides* (Grumatã).

O *Astyanax cf. bimaculatus* (Linnaeus, 1758), conhecido popularmente como lambari, pertence à família Characidae (Fricke, Eschmeyer e Fong, 2018). Nessa família

estão peixes de hábitos alimentares muito diversificados (herbívoros, onívoros, carnívoros) e que exploram uma grande variedade de habitats (Britski *et al.*, 1998), ocorrem em praticamente todos os ambientes de água doce e distribuem-se nos continentes americanos, desde a fronteira México-Estados Unidos até o Sul da Argentina, e África (Lucena, 1993). Na América do Sul essa família compreende cerca de 30 subfamílias e aproximadamente 250 gêneros (Britski, 1972) e 1406 espécies (Froese; Pauly, 2004).

O *Astyanax cf. bimaculatus* é uma espécie de pequeno porte, destaca-se a sua ampla distribuição desde o nordeste brasileiro até a bacia do Prata (Barbieri *et al.*, 1982). Eles são importantes para a estrutura trófica dos ecossistemas brasileiros (Prado *et al.*, 2011), promovendo o equilíbrio desses ambientes, rios da América do Sul e Central, estão bem representados em tais ecossistemas no Brasil (Carvalho *et al.*, 2009; Weber *et al.*, 2012). Esses peixes podem ser reconhecidos pela presença de uma mancha ovalada escura na região umeral e outra na região caudal (Britski, 1964; 1972).

A desova do *Astyanax cf. bimaculatus* é parcelada e o período de desova é de setembro a março (Vazzoler e Menezes, 1992, Pereira Filho, 2000). A atividade reprodutiva se inicia a partir dos quatros meses de idade, quando os machos apresentam cerca de 7 a 9 cm de comprimento e 9 e 12 cm, com os primeiros apresentando corpo alongado e nadadeira anal com espículas ásperas (Porto-Foresti *et al.*, 2010). Eles habitam rios, riachos e lagoas sempre em ambientes de baixa altitude (até 50m), onde se alimentam de larvas terrestres e insetos que caem na superfície da água (Oyakawa *et al.*, 2006).

A grumatã, *Prochilodus vimboides* (Kner, 1859), pertence a família Prochilodontidae e ao gênero Prochilodus. Possuem o hábito alimentar bentófago-detritívoro, possuindo importante papel na ciclagem de nutrientes (Flecker, 1996). Estudos apontaram que o gênero Prochilodus, é distribuído por rios de toda a América do Sul (Sato; Godinho, 2003; Agostinho *et al.*, 2004, 2007; Bailly; Agostinho; Suzuki, 2008).

A *Prochilodus vimboides* é uma espécie de médio a grande porte, com grandes escamas ásperas, reofílico (Potamódromo), iliófaga. Se alimentam de detritos orgânicos encontrados na água e de organismos bentônicos, como: crustáceos, larvas e ovos de moluscos, larvas de insetos, entre outros organismos que se encontram no fundo ou leitos dos rios (Castagnolli, 1992; Proença; Bittencourt, 1994). Pode ser encontrada em porções das bacias dos rios São Francisco e Alto Paraná, também se distribui por toda bacia do rio Paraíba do Sul (Castro e Vari, 2004), Itabapoana e Imbé (Polaz *et al.*, 2011), assim

como o rio Doce. Os reservatórios são responsáveis pela alteração ou eliminação dos ambientes lóticos ocupados por esta espécie e, juntamente com a poluição (Polaz *et al.*, 2011), está se encontra na categoria de conservação como vulnerável (SiBBr, 2023).

## 2. OBJETIVOS

Esse estudo tem como objetivo avaliar a susceptibilidade ao barotrauma de duas espécies Neotropicais, o lambari (*Astyanax cf. bimaculatus*) e a grumatã (*Prochilodus vimboides*), em função da variação rápida de pressão. Ambas as espécies são reofílicas, estando sujeitas às interações deletérias com usinas hidroelétricas (Silva, 2012; Silva, 2020).

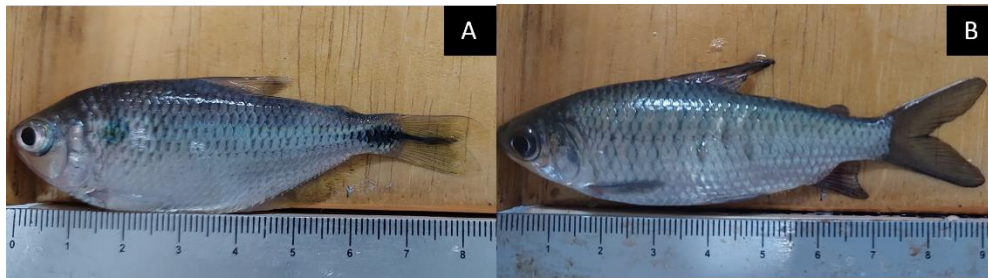
### Objetivos específicos

- Avaliar os efeitos de diferentes razões de descompressão na incidência de injúrias em *A. bimaculatus* e *P. vimboides*;
- Avaliar os efeitos de diferentes taxas de descompressão na incidência de injúrias em *Astyanax cf. bimaculatus*;
- Avaliar a capacidade de sobrevivência de *A. bimaculatus* após variações rápidas de pressão.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Espécies estudadas, transporte e manutenção em laboratório

As espécies selecionadas são: o *Astyanax cf. bimaculatus* (Fig. 1-A) e *Prochilodus vimboides* (Fig. 1-B). Ambas as espécies foram disponibilizadas pela parceria com o “Projeto Piabanha”, organização socioambiental não-governamental que atua na conservação das espécies de peixes ameaçados de extinção da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, Itaocara – RJ.



**Figura 1.** A) *Astyanax cf. bimaculatus*; B) *Prochilodus vimboides*. (Fonte: arquivo pessoal)

Os peixes foram capturados em tanques de manutenção presentes na sede do Projeto Piabanha (Itaocara, RJ), colocados em sacos plásticos contendo água e oxigênio e enviados por transporte terrestre para o Laboratório de Ecologia Molecular e Ictiologia (LEMI) da UFSJ. Os peixes passaram por um período de 7 dias de aclimação em tanques de manutenção, onde foram monitorados quanto as suas condições (de acordo com Boys *et al.*, 2016).

Os tanques de manutenção possuíam a capacidade de 370 L e dimensões de 980 x 655 x 580 mm (Larg x Comp x Alt), conectados por um sistema de filtragem biológica/mecânica (Fig. 2). Os tanques foram monitorados diariamente (2x) quanto aos seguintes parâmetros: temperatura, nitrito e amônia. Os peixes foram alimentados diariamente com ração comercial (35% de proteína do tipo extrusada). A água era renovada a cada dois dias ou caso fosse necessário, todos os dias.

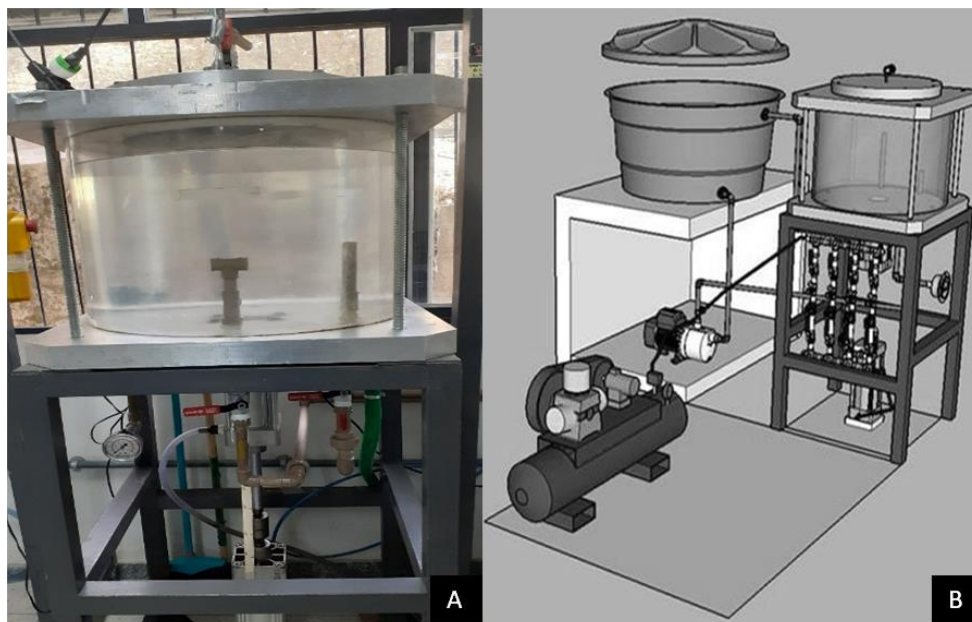


**Figura 2.** Tanque de manutenção das espécies no período de aclimação. (Fonte: arquivo pessoal)

### 3.2 Câmara Hipo-hiperbárica

Para simular os efeitos da variação rápida de pressão em peixes, foi utilizada uma câmara denominada Câmara Hipo-HiperBárica (CHHB), projetada para simular variações rápidas de pressão, como aquelas observadas na passagem por turbina de uma UHE, eliminando outras variáveis com potencial capacidade de gerar lesões (e.g. choques mecânicos, cavitação, turbulência, forças de cisalhamento), tendo sido adaptada dos modelos descritos em Stephenson *et al.* (2010) e Brown *et al.* (2014).

A câmara é composta por um tubo acrílico cilíndrico para permitir a visualização dos peixes durante os experimentos, com diâmetro de 600 mm, altura de 410 mm e espessura de 8 mm de parede, com escotilha de acesso na parte superior (Fig. 3A). A câmara é alimentada por um reservatório de água com a capacidade de 500 litros ligado a uma bomba multiestágio trifásico (ME-AL 2250V, 5.0CV, Schneider®), controlada por um inversor de frequência (CFW-08 4ª, WEG®). O inversor controla a quantidade de água que é bombeada para o interior da câmara, ao passo que os registros localizados na parte inferior da câmara controlam a quantidade de água que sai da câmara (Fig. 3B). Tal controle de entrada e saída de água permite que a câmara seja pressurizada à diferentes pressões até o limite de 557 kPa (~56 m.c.a), enquanto os registros (saída) permitem controlar as descompressões.



**Figura 3.** A) Câmara hipo-hiperbárica no Laboratório de Ecologia Molecular e Ictiologia (LEMI) da Universidade Federal de São João Del-Rei – UFSJ. (Fonte: arquivo pessoal). B) Esquema representativo dos componentes do aparato de descompressão câmara hipo-hiperbárica. Adaptado de Marques (2017).

### 3.3 Procedimentos Experimentais

Nesse estudo foi avaliada a incidência de lesões (barotraumas) em peixes submetidos à diferentes perfis de pressão e taxas de descompressão, além da sobrevivência após descompressões. Para todos os diferentes tipos de experimentos realizados, algumas etapas se mostraram comuns, e serão descritas agora.

### *3.3.1 Aclimação*

Cada espécie, quando submetida a uma alteração de pressão, tende a buscar o equilíbrio hidrostático (flutuabilidade neutra- nado na horizontal), controlando a quantidade de gases presentes em suas bexigas gasosas. Nos experimentos aqui realizados, os peixes foram retirados dos tanques de manutenção e transferidos para o interior das CHHB, a pressão atmosférica (102Kpa), e submetidos à diferentes perfis de pressão (102 à 408kPa, a depender do experimento) antes de serem rapidamente descomprimidos. Nessa etapa, a definição das pressões em que os peixes foram mantidos (aclimatados) antes da descompressão é que determina as **razões de descompressão** (RDC) a serem testadas.

Para identificar o tempo necessário para atingir o equilíbrio (flutuabilidade neutra) antes de serem descomprimidos, 10 indivíduos de cada espécie foram pressurizados à maior pressão em que a espécie seria exposta durante o estudo, sendo esses indivíduos observados ao longo do tempo. Por se tratar de espécies fisóstomas, durante o processo de pressurização uma bolha de ar foi mantida no interior da câmara, permitindo o seu uso pelos peixes durante sua aclimação (período que eles ficam dentro da câmara até atingir o equilíbrio, apresentando nado na horizontal).

O tempo mínimo de aclimação, foi definido quando todos os indivíduos pressurizados nadavam horizontalmente. Esse tempo mínimo de aclimação de cada espécie foi então utilizado para os diferentes testes. Durante a fase de aclimação, a pressurização até a pressão a ser testada foi, em média, de 5 minutos. O aumento lento e gradual da pressão teve como objetivo minimizar os eventuais efeitos da compressão nos peixes. Depois de atingido o tempo de aclimação desejado, iniciou-se o processo de descompressão.

### *3.3.2 Descompressão*

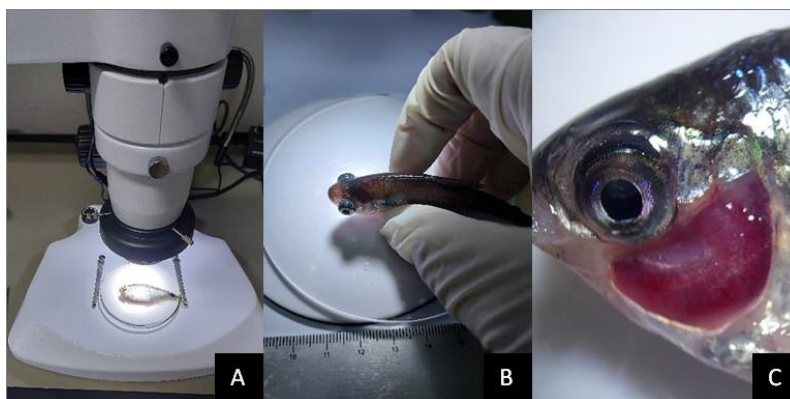
A primeira etapa da descompressão é a retirada da bolha de ar presente no interior da câmara, utilizada pelos peixes para a sua aclimação à pressão a ser testada. Uma válvula de ar presente no topo da câmara é aberta de forma parcial para retirada de todo

o ar do interior da câmara, sem alterar a pressão de aclimação. Concluído esse processo, inicia-se a etapa de decompressão, que é obtida pela abertura das válvulas de saída de água, além do desligamento da bomba e abertura da válvula de saída de ar (evitar pressões negativas).

Na etapa da decompressão é quando se determina e controla a velocidade em que a câmara será descomprimida até a pressão atmosférica, ou em outras palavras, a **Taxa de Decompressão (TDC)**. Após a decompressão, a câmara é aberta e os peixes são rapidamente retirados, podendo ser eutanasiados para a avaliação da presença das injúrias ou mantidos vivos para avaliar a sobrevivência após a decompressão. Os dados de pressão registrados durante o processo de pressurização, aclimação e decompressão são salvos em um arquivo exportável, sendo utilizados para calcular as RDC e TDC.

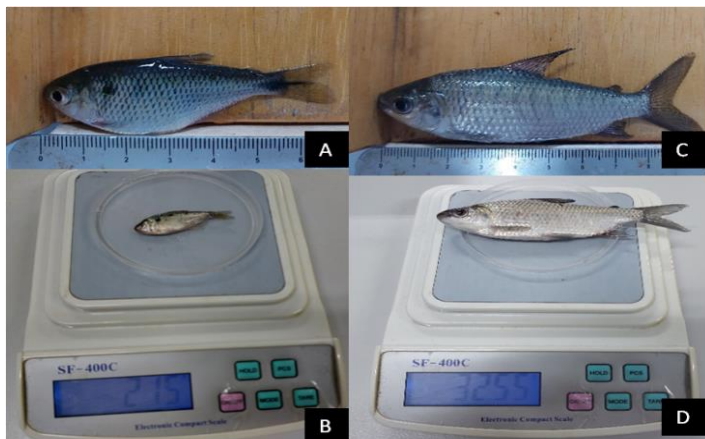
### 3.3.3 Avaliação das lesões

Após a decompressão, os peixes foram retirados da câmara com o auxílio de uma rede do tipo puçá e imediatamente eutanasiados (à exceção do teste de sobrevivência). A eutanásia se deu por imersão em solução hiperconcentrada de Eugenol, na concentração 1 ml para 10 litros de água (Soares, 2016). Cada indivíduo foi fotografado, medido e pesado (Fig. 5). As imagens das lesões observadas, foram obtidas através de um microscópio estereomicroscópico trinocular modelo NSZ-810 com câmera integrada ao *software capture V2.2*. Cada lesão foi fotografada e os dados planilhados de acordo com o tipo injúria observada (Fig. 4).



**Figura 4.** Avaliação feita após a eutanásia. A- Microscópio utilizado; B-Momento de observação da injúria; C- Foto retirada após observação. (Fonte: arquivo pessoal)





**Figura 5.** Medição e pesagem de *A.cf bimaculatus* (A-B) e *P. vimboides* (C-D) eutanasiados após a descompressão. (Fonte: arquivo pessoal).

### 3.3 Avaliação das diferentes razões de descompressão (RDC)

A avaliação do efeito das Razões de descompressão sobre a incidência de injúrias foi testada para duas espécies, *A. cf bimaculatus* e *P. vimboides*.

#### 3.3.1 *Astyanax cf. bimaculatus*

Os peixes da espécie *A. cf bimaculatus* foram retirados dos tanques de manutenção e colocados na câmara hipo-hiperbárica, sendo mantidos na pressão de aclimação por cerca de 6:30 horas antes da descompressão, mantendo a pressão constante através da regulação do fluxo de água. Para a espécie, foram avaliadas descompressões a partir de cinco pressões distintas (pressão absoluta): 102 kPa (controle), 153 kPa, 255 kPa, 357 kPa e 408 kPa.

Para cada pressão de aclimação os experimentos foram realizados em quatro repetições, com 15 indivíduos em cada, resultando em 60 indivíduos submetidos a cada uma das RDC e 300 indivíduos no total.

#### 3.3.2 *Prochilodus vimboides*

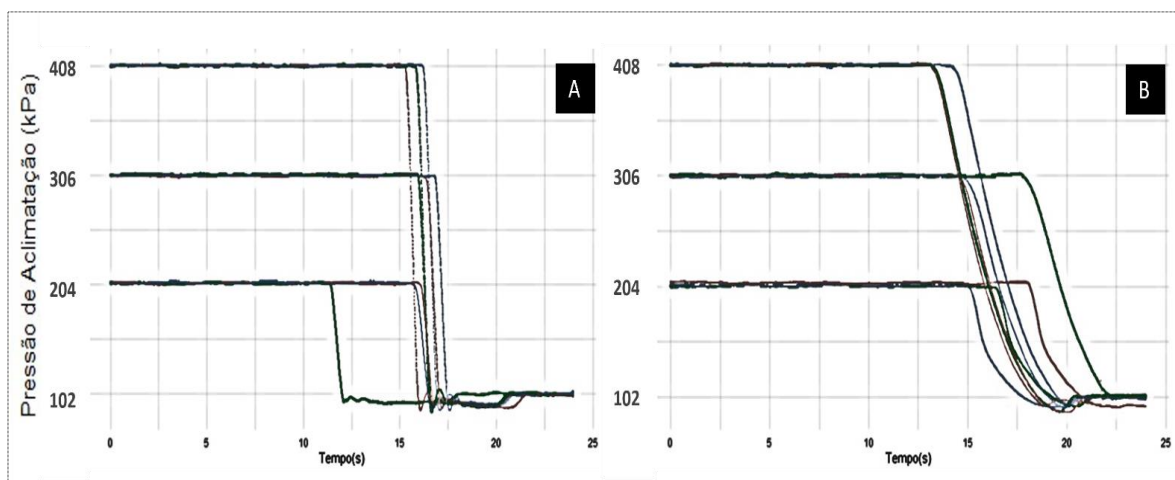
Os peixes da espécie *P. vimboides* mantidos na pressão de aclimação por cerca de 5:00 horas antes da descompressão, mantendo a pressão constante através da regulação do fluxo de água. Para a espécie, foram testadas sete pressões distintas (pressão absoluta): 102 kPa (controle), 153 kPa, 204 kPa, 255 kPa, 306 kPa, 357 kPa e 408 kPa.

Para cada pressão de aclimação os experimentos foram realizados em seis réplicas. Cada grupo experimental apresentou 5 indivíduos sendo, portanto, 30 indivíduos para cada cenário e 210 peixes no total.

### 3.4 Avaliação das diferentes Taxas de descompressão (TDC)

A avaliação do efeito das taxas de descompressão sobre a incidência de injúrias foi testada para *A. cf bimaculatus*, onde indivíduos da espécie foram expostos a quatro pressões de aclimação: 102kPa (controle), 204kPa, 306kPa e 408kPa. Para cada pressão de aclimação que não o controle, duas taxas diferentes de descompressão (TDC) foram testadas, sendo uma semelhante as taxas utilizadas nos experimentos de RDC (a ser tratada como TDC-I), enquanto a outra a descompressão foi ajustada para ocorrer de forma mais lenta (Fig. 6).

As diferentes TDC foram obtidas ao limitar a abertura do registro de saída, fazendo com que o tempo para atingir a pressão nadir (menor pressão atingida) passasse de 0.88 segundos a 2.49 segundos na Taxa de Descompressão I(TDC-I), e de 4.7 segundos a 6.3 segundos na Taxa de Descompressão II (TDC-II). Um único controle, para cada pressão de aclimação foram realizadas trélicas.



**Figura 6.** Taxa de descompressão (TDC). A) Taxa de descompressão semelhante aos experimentos avaliando efeitos da RDC (TDC-I); B) Taxa de descompressão em velocidade reduzida por limitação na abertura das válvulas de saída da CHHB (TDC-II).

### 3.5 Avaliação da sobrevivência após variações rápidas de pressão

Para a taxa de sobrevivência foram observados e quantificados os indivíduos de *A. bimaculatus*, que estavam vivos 120 horas após a descompressão induzida. Logo após a descompressão, dos 15 peixes do primeiro experimento, cinco foram eutanasiados (caso não tenham morrido imediatamente após a descompressão) e 10 foram mantidos vivos.

A seleção dos peixes se deu de forma aleatória (à exceção daqueles declarados mortos de imediato), e a eutanásia foi realizada por imersão em solução hiperconcentrada de Eugenol (Soares, 2016).

Os demais peixes vivos foram transportados para um tanque contendo divisórias que permitia a separação dos grupos experimentais. Estes animais foram monitorados ao longo de 120 horas, com objetivo de avaliar a sobrevivência dos animais após a descompressão. Os peixes que morriam nos tanques eram imediatamente necropsiados para avaliar a presença de lesões resultantes da descompressão.

Após 120 horas desde a descompressão, todos os peixes ainda vivos eram eutanasiados e necropsiados para determinar se haviam sofrido algum tipo de dano não letal, analisados externamente e internamente com auxílio de um microscópio estereoscópio. Todos os dados foram registrados em tabelas que continham as possíveis injúrias e os locais onde foram encontrados.

### 3.6 Análises dos dados

Para cada perfil de pressão testados (RDC e TDC) os indivíduos foram avaliados quanto a ocorrência de injúria (presença/ausência). Em seguida, foi calculada a frequência de ocorrência das injúrias para cada razão de descompressão obtida, através da equação:  $F\% = F/n \times 100$ , onde: (F) = número de lesões observadas para o grupo experimental e; (n) = número total de peixes em cada um dos experimentos.

Para cada grupo experimental foi calculada a razão de descompressão das pressões trabalhadas, através da equação:  $R = PA/PN$ , onde: PA é a pressão de aclimatação em que os peixes foram submetidos e PN a pressão nadir (menor pressão após a descompressão). As injúrias encontradas foram agrupadas em seis tipos: hemorragia, embolia, ruptura da bexiga, vasos hipertrofiados, exoftalmia e trauma. Essas injúrias foram comparadas em função da razão de descompressão.

Primeiramente, foram realizados testes para verificar a normalidade dos dados obtidos (Shapiro-Wilk,  $p < 0.05$ ). A partir da não normalidade indicada pelo teste Kruskal-Wallis, para verificar diferenças significativas entre as diferentes razões de descompressão utilizadas. Para os grupos onde foram detectadas diferenças significativas apliquei o teste de Mann-Whitney, para avaliar entre quais razões de descompressão a diferença foi registrada. As análises estatísticas foram realizadas através do software R 4.3.1 (R Core Team, 2023).

Os dados referentes às lesões e as razões de descompressão também foram analisados utilizando o modelo linear generalizado por partes (ou Piecewise linear regression) (TOMS & LESPERANCE. 2003). conforme descrito por Boys *et al.* (2016). para determinar os limiares de descompressão biologicamente relevantes para a proteção de peixes.

#### 4. RESULTADOS

O estudo foi realizado no período de agosto de 2022 a julho de 2023, contabilizando 83 testes realizados em três grupos experimentais e um total de 720 peixes testados para as duas espécies. De modo geral, a incidência de algum tipo de lesão foi observada em todos os testes realizados, onde 90% dos animais submetidos a experimento foram afetados (Tabela 1).

**Tabela 1.** Número de peixes experimentados de *Astyanax cf bimaculatus* e *Prochilodus vimboides* em cada grupo experimental, submetidos à descompressão, controle e com lesões.

Espécies	Tratamentos	N perfis de pressão testados	TDC	Réplicas (N peixes por teste)	N de peixes testados (+ Controle)	N peixes com lesões (%)
<i>A. cf bimaculatus</i>	RDC & Sobrevivência	05	TDC-I	04 (15)	240 (60)	255 (85%)
<i>A. cf bimaculatus</i>	TDC	04	TDC-I TDC-II	04(10)	180 (30)	189 (90%)
<i>P.vimboides</i>	RDC	07	TDC-I	06 (05)	180 (30)	204 (97%)
				TOTAL	600 (120)	648 (90%)

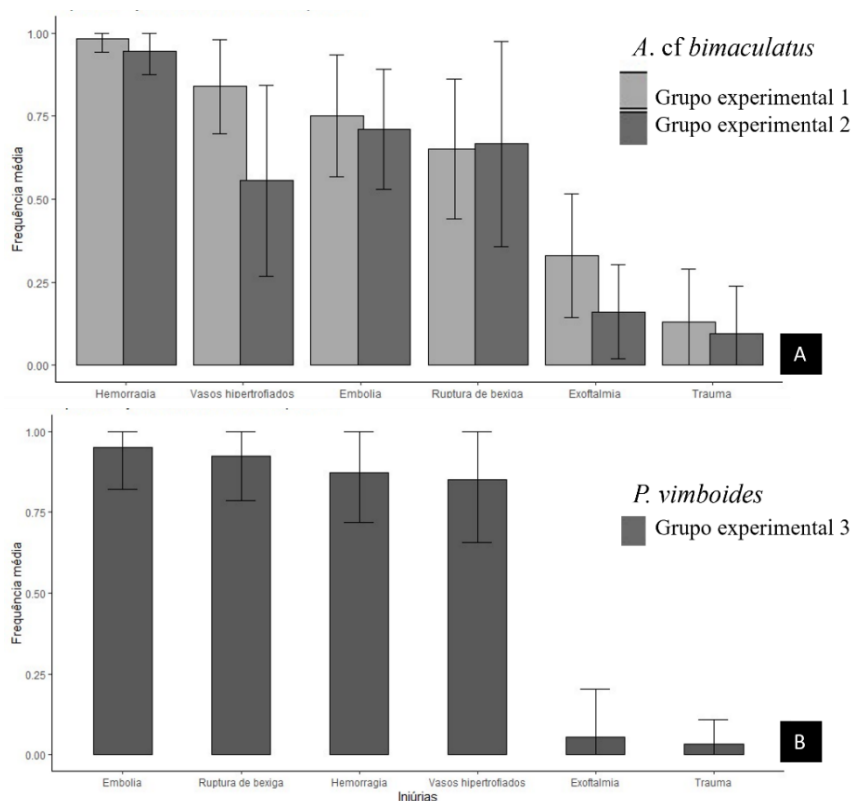
Ao todo, foram observados seis tipos principais de injúrias, sendo que em alguma delas, a ocorrência se deu em múltiplos órgãos. Na tabela 2 é apresentada uma descrição das características observadas para cada tipo de injúria, bem em que parte do corpo foram registradas.

**Tabela 2.** Injúrias observadas nos exemplares de *Astyanax cf bimaculatus* e *Prochilodus vimboides*, suas respectivas descrições e locais detectados

TIPOS DE INJÚRIAS	LOCAL/ÓRGÃO	DESCRIÇÃO
-------------------	-------------	-----------

<b>Hemorragia</b>	Pele, olhos, nadadeiras, opérculo, brânquias, coração, bexiga, fígado, vísceras.	Pontos de sangramento ou pressão causados pela expansão dos gases presentes dentro das cavidades.
<b>Embolia</b>	Pele, olhos, nadadeiras, opérculo, brânquias, coração, vísceras.	A expansão de gases que ficam presos em órgãos ou tecidos, no lúmen dos órgãos.
<b>Trauma</b>	Pele, nadadeiras, opérculo, olhos,	Lesões físicas graves ou ferimentos.
<b>Exoftalmia</b>	Olhos	A pressão interna (geralmente pelo rompimento da bexiga natatória) faz com que os olhos sejam empurrados para fora da cavidade ocular.
<b>Ruptura da bexiga</b>	Bexiga natatória	A expansão do gás presente na bexiga causa um aumento do volume a uma velocidade maior do que a bexiga consegue liberá-lo, levando ao rompimento.
<b>Vasos hipertrofiados</b>	Veias	Vasos sanguíneos dilatados, que se tornou mais amplo do que o normal.

As frequências médias de ocorrências das principais injúrias diferiram para as duas espécies avaliadas (Fig. 7).



**Figura 7.** Frequência média de ocorrência das principais injúrias observadas nas espécies *A. bimaculatus*, nos grupos experimentais 1 e 2(A) e *P. vimbooides*, no grupo experimental 3 (B).

Após a decompressão trinta e cinco ocorrências de lesões foram pontuadas, nos seguintes locais: pele, olhos, nadadeiras (pélvica, peitoral, dorsal, anal, caudal), opérculo,

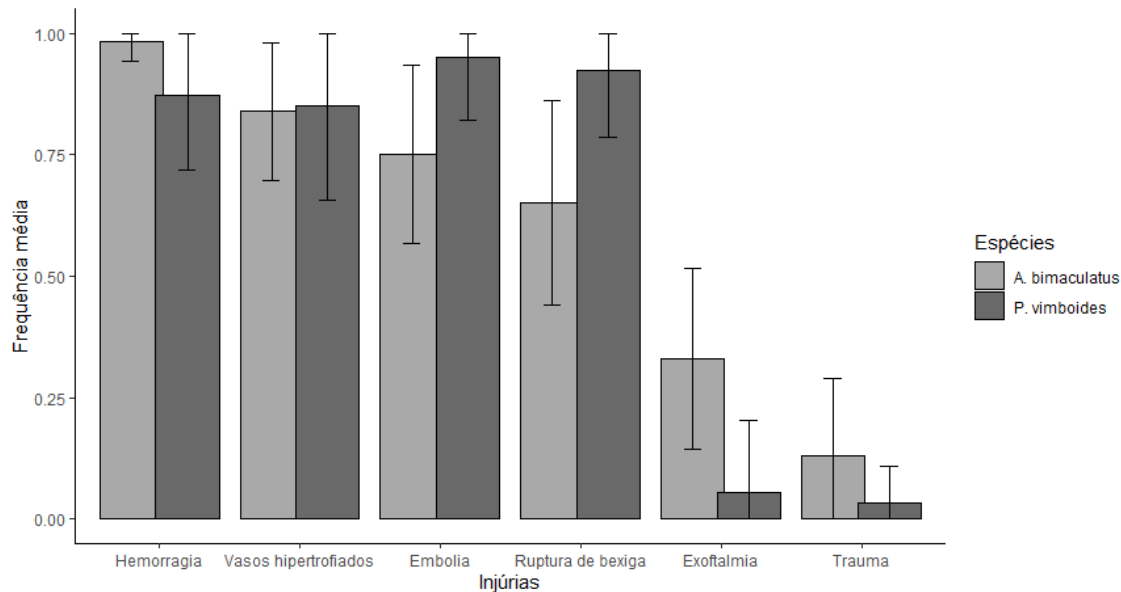
brânquias, coração, vasos sanguíneos, vísceras, bexiga natatória e fígado, conforme a tabela 3.

**Tabela 3:** Locais de observação de injúrias de *A. cf bimaculatus* e *P. vimboides*. M+SD = número médio de indivíduos afetados testados por réplica + desvio padrão; % MÉDIA = porcentagem média de indivíduos que apresentaram a lesão; Min-Max = número mínimo e máximo de indivíduos que apresentaram a lesão

		ESPÉCIES								
		<i>A. cf bimaculatus</i>			<i>A. cf bimaculatus</i>			<i>P. vimboides</i>		
		300 indivíduos			210 indivíduos			210 indivíduos		
		20 réplicas			21 réplicas			42 réplicas		
		15 ind./réplica			10 ind./réplica			5 ind./réplica		
INJÚRIA	ORGÃO	M ± SD	% Média	Min-Max	M ± SD	% Média	Min-Max	M ± SD	% Média	Min-Max
HEMORRAGIA	Pele	0,55 ± 0,83	3,67%	0-2	0,05 ± 0,22	0,5%	0-1	0,39 ± 0,70	7,8%	0-3
	Olhos	6,50 ± 4,05	43,33 %	0-13	5,05 ± 2,83	50,5%	0-10	1,58 ± 1,55	31,6 %	0-5
	Nadadeiras	4,95 ± 3,86	33%	0-13	2,62 ± 2,50	26,2%	0-7	0,81 ± 1,02	16,2%	0-4
	Opérculo	3,85 ± 3,04	25,66%	0-10	2,05 ± 1,56	20,5%	0-6	0,03 ± 0,16	0,6%	0-1
	Brânquias	7,65 ± 5,15	51%	0-14	2,43 ± 3,56	24,3%	0-9	0,22 ± 0,42	4,4%	0-1
	Coração	3,60 ± 3,99	24%	0-11	0	0%	0	0	0%	0
	Vísceras	7,65 ± 5,03	51%	0-14	4 ± 2,74	40%	0-9	3,33 ± 1,46	66,6%	0-5
	Bexiga	0,70 ± 1,50	4,66%	0-5	0	0%	0	0,08 ± 0,35	1,6%	0-2
	Natatória									
	Fígado	6,60 ± 4,25	44%	0-13	4,10 ± 2,55	41%	0-9	1,31 ± 1,12	26,2%	0-4
EMBOLIA	Pele	0	0%	0	0	0%	0	0,22 ± 0,65	4,4%	0-3
	Olhos	1,80 ± 2,15	12%	0-6	0,72 ± 0,79	7,2%	0-2	0,29 ± 0,51	5,8%	0-2
	Nadadeiras	3,55 ± 3,04	23,66%	0-8	2,62 ± 2,44	26,2%	0-7	3,40 ± 2,04	68%	0-5
	Opérculo	1,20 ± 1,97	8%	0-6	0,24 ± 0,63	2,4%	0-2	0,09 ± 0,35	1,8%	0-2
	Brânquias	1,50 ± 2,35	10%	0-9	0,15 ± 0,36	1,5%	0-1	0,24 ± 0,54	4,8%	0-2
	Coração	4,30 ± 3,56	28,66%	0-11	3,58 ± 1,84	35,8%	0-6	3,78 ± 1,02	75%	2-5
	Vísceras	3,00 ± 2,72	20%	0-8	1,10 ± 1,14	11%	0-4	1,81 ± 1,61	36,2 %	0-5
TRAUMA	Pele	0,80 ± 1,71	5,33%	0-5	0	0%	0	0,15 ± 0,36	3%	
	Olhos	0,05 ± 0,23	0,33%	0-1	0	0%	0	0	0%	0
	Nadadeiras	0	0%	0	0,15 ± 0,66	1,5%	0-3	0	0%	0
	Opérculo	1,00 ± 1,90	6,66%	0-7	0,29 ± 0,79	2,9%	0-3	0	0%	0
RUP. BEXIGA	Bexiga	7,55 ± 4,96	50,33%	0-14	6,19 ± 3,44	61,9%	0-10	3,95 ± 1,76	79%	0-5
EXOFTALMIA	Olhos	3,60 ± 3,35	24%	0-9	5,95 ± 2,75	59,5%	0-10	0,24 ± 0,70	4,8%	0-4
VASOS HIPER.	Veias	10,40 ± 5,20	69,33%	0-15	1,43 ± 1,47	14,3%	0-5	4,09 ± 1,12	81,8%	0-5

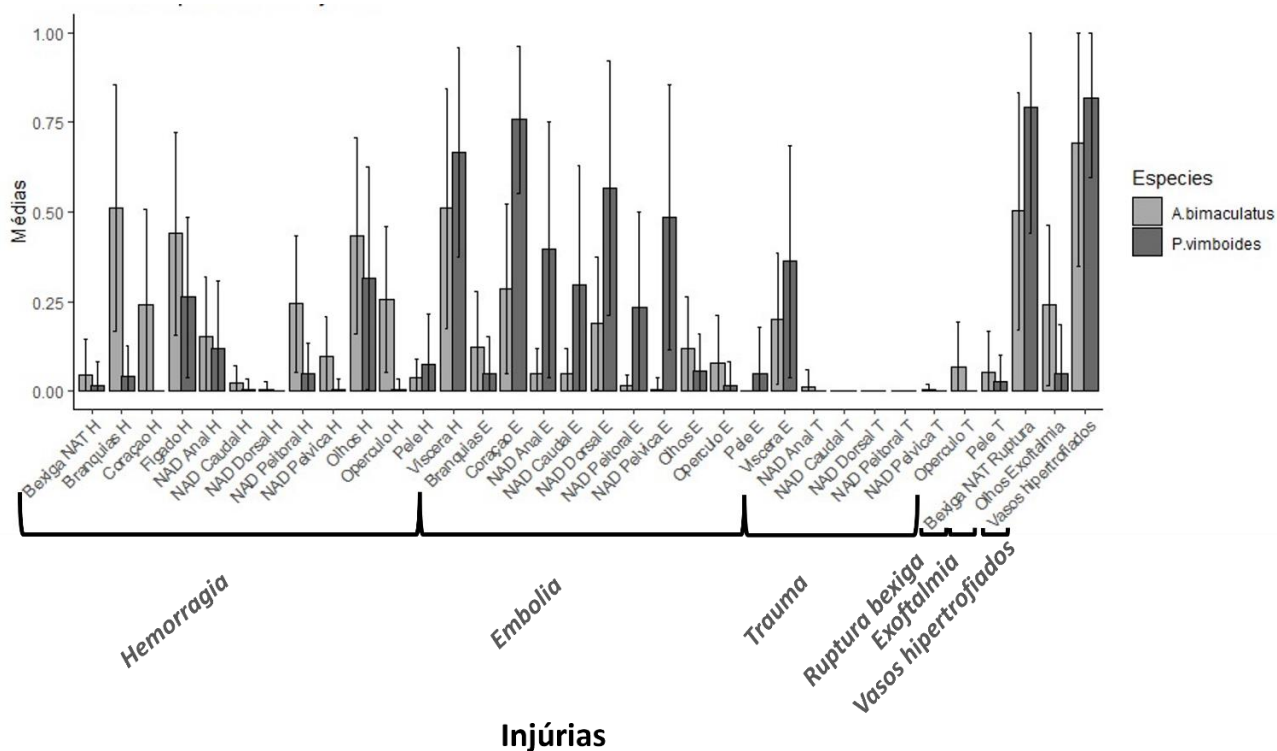
#### 4. 1 Avaliação das diferentes razões de descompressão (RDC)

Um total de 300 indivíduos de *A. cf bimaculatus* e 210 indivíduos de *P. vimboides* foram submetidos a descompressão induzida em diferentes RDC. As injúrias observadas em *A. cf bimaculatus* e *P. vimboides* independentes da RDC, foram a hemorragia, os vasos hipertrofiados, embolia, ruptura da bexiga, já em menor frequência tem-se exoftalmia e o trauma (Fig. 8).



**Figura 8.** Principais injúrias observadas nas espécies *Astyanax cf bimaculatus* e *P. vimboides*.

A Fig. 9 traz a distribuição de frequência dos seis tipos principais de injúrias, de acordo com o órgão acometido.



**Figura 9.** Lesões pontuadas após a descompressão em *A. cf bimaculatus* (Lambari) e *P. vimboides* (Grumatã). H (hemorragia); E (embolia); R (ruptura); L (trauma); Ex (exoftalmia).

Foram cinco RDC (1; 1.33; 2.09; 3.17; 3.34) para *A. cf bimaculatus* e sete RDC para *P. vimboides* (0.96; 1.37; 1.78; 2.18; 2.56; 3.04; 3.43), em seguida, foram feitas a avaliação dos órgãos afetados.

#### *Frequência de ocorrência de injúrias nos órgãos*

Foram pontuadas as lesões em órgãos específicos após a descompressão em função da RDC, sendo observadas as injúrias de hemorragia, embolia, trauma, ruptura de bexiga, exoftalmia e vasos hipertrofiados. Foram observadas para *A. cf bimaculatus* e *P. vimboides*, a frequência média de lesões nos órgãos, de acordo com os dados das tabelas 4 e 5, para ambas as espécies. Na análise por órgãos quanto a hemorragia, o coração, o fígado e as brânquias apresentaram médias superiores em 71% dos indivíduos, *A. cf bimaculatus*. Em *P. vimboides* apenas nas vísceras foi superior em 70% dos indivíduos. Quanto a embolia para *A. cf bimaculatus*, nas nadadeiras em todas as RDC foi superior em 83% dos indivíduos, e no coração em todas as RDC foram superiores em 76% dos indivíduos. Já em *P. vimboides* apenas nas vísceras foram superiores em 70% dos indivíduos.

**Tabela 4.** Frequência de ocorrência de injúrias de acordo com os órgãos avaliados, M  $\pm$  SD (média e desvio padrão) %M (percentual da média) em *A. cf bimaculatus*.

<i>A. cf bimaculatus</i>		RDC									
INJÚRIA	ORGÃO	1.0 M $\pm$ SD	% M	1.33 M $\pm$ SD	% M	2.09 M $\pm$ SD	% M	3.17 M $\pm$ SD	% M	3.34 M $\pm$ SD	% M
<b>HEMORRAGIA</b>	Pele	0,00	0,0%	5,75 $\pm$ 4,57	38,3%	0,75 $\pm$ 0,96	5,0%	0,50 $\pm$ 1,00	3,3%	0,00	0,0%
	Olhos	0,75 $\pm$ 0,50	5,0%	10,25 $\pm$ 3,10	68,3%	9,00 $\pm$ 2,94	60,0%	9,00 $\pm$ 1,83	60,0%	8,00 $\pm$ 2,83	53,3%
	Nadadeiras	0,75 $\pm$ 0,50	5%	10,25 $\pm$ 3,10	68,3%	4,50 $\pm$ 1,74	30%	5,75 $\pm$ 0,50	38,3%	3,50 $\pm$ 4,05	28,3%
	Opérculo	1 $\pm$ 0,82	6,6%	5,75 $\pm$ 4,04	38,3%	4,25 $\pm$ 4,04	28,3%	5,25 $\pm$ 0,96	35,0%	3,00 $\pm$ 2,17	20,0%
	Brânquias	0,75 $\pm$ 0,50	5%	6,00 $\pm$ 6,05	40,0%	9,50 $\pm$ 3,32	63,3%	12,25 $\pm$ 1,71	81,6%	9,75 $\pm$ 3,31	65,0%
	Coração	0	0%	2,75 $\pm$ 4,86	18,3%	5,00 $\pm$ 4,90	33,3%	5,50 $\pm$ 4,12	36,6%	4,75 $\pm$ 2,99	31,6%
	Vísceras	0	0%	11,50 $\pm$ 3,00	76,6%	8,50 $\pm$ 5,00	56,6%	9,00 $\pm$ 4,40	60,0%	9,25 $\pm$ 1,50	61,6%
	Bexiga	0	0%	1,00 $\pm$ 1,42	6,6%	0,25 $\pm$ 0,50	1,6%	1,00 $\pm$ 2,00	6,6%	1,25 $\pm$ 2,50	8,3%
	Natatória	0	0%	5,75 $\pm$ 1,50	38,3%	9,00 $\pm$ 3,17	60,0%	10,75 $\pm$ 2,06	71,6%	7,50 $\pm$ 2,65	50,0%
<b>EMBOLIA</b>	Pele	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Olhos	0	0%	0	0%	2,75 $\pm$ 2,63	18,3%	3,75 $\pm$ 2,22	25,0%	2,50 $\pm$ 1,30	16,6%
	Nadadeiras	0,25 $\pm$ 0,50	1,6%	1,25 $\pm$ 1,26	8,3%	6,00 $\pm$ 1,15	40,0%	5,00 $\pm$ 2,95	33,3%	5,25 $\pm$ 3,21	35,0%
	Opérculo	0	0%	0,25 $\pm$ 0,5	1,6%	2,00 $\pm$ 2,71	13,3%	1,25 $\pm$ 2,50	8,3%	2,50 $\pm$ 2,08	16,6%
	Brânquias	0	0%	1,25 $\pm$ 0,96	8,3%	2,75 $\pm$ 4,27	18,3%	3,00 $\pm$ 2,00	20,0%	2,25 $\pm$ 1,90	15,0%
	Coração	0,25 $\pm$ 0,50	1,6%	3,75 $\pm$ 2,99	25,0%	6,5 $\pm$ 3,70	43,3%	6,00 $\pm$ 3,91	40,0%	5,00 $\pm$ 2,95	33,3%
	Vísceras	0	0%	5,25 $\pm$ 2,5	35,0%	3,25 $\pm$ 2,99	21,6%	4,25 $\pm$ 1,26	28,3%	2,25 $\pm$ 2,88	15,0%
<b>TRAUMA</b>	Pele	1,5 $\pm$ 2,38	10%	0	0%	1,25 $\pm$ 2,50	8,3%	1,25 $\pm$ 1,90	8,3%	0	0%
	Olhos	0,25 $\pm$ 0,50	1,6%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Nadadeiras	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Opérculo	1,00 $\pm$ 2,00	6,6%	1,00 $\pm$ 0,82	6,6%	2,75 $\pm$ 3,40	18,3%	0,25 $\pm$ 0,50	1,6%	0	0%
<b>RUP. BEXIGA</b>	Bexiga	0	0%	7,75 $\pm$ 4,35	51,6%	9,75 $\pm$ 2,88	65,0%	11,50 $\pm$ 1,74	76,6%	8,75 $\pm$ 4,50	58,3%
<b>EXOFTALMIA</b>	Olhos	0	0%	1,00 $\pm$ 1,15	6,6%	5,75 $\pm$ 2,99	38,3%	6,25 $\pm$ 2,76	41,6%	5,00 $\pm$ 2,95	33,3%



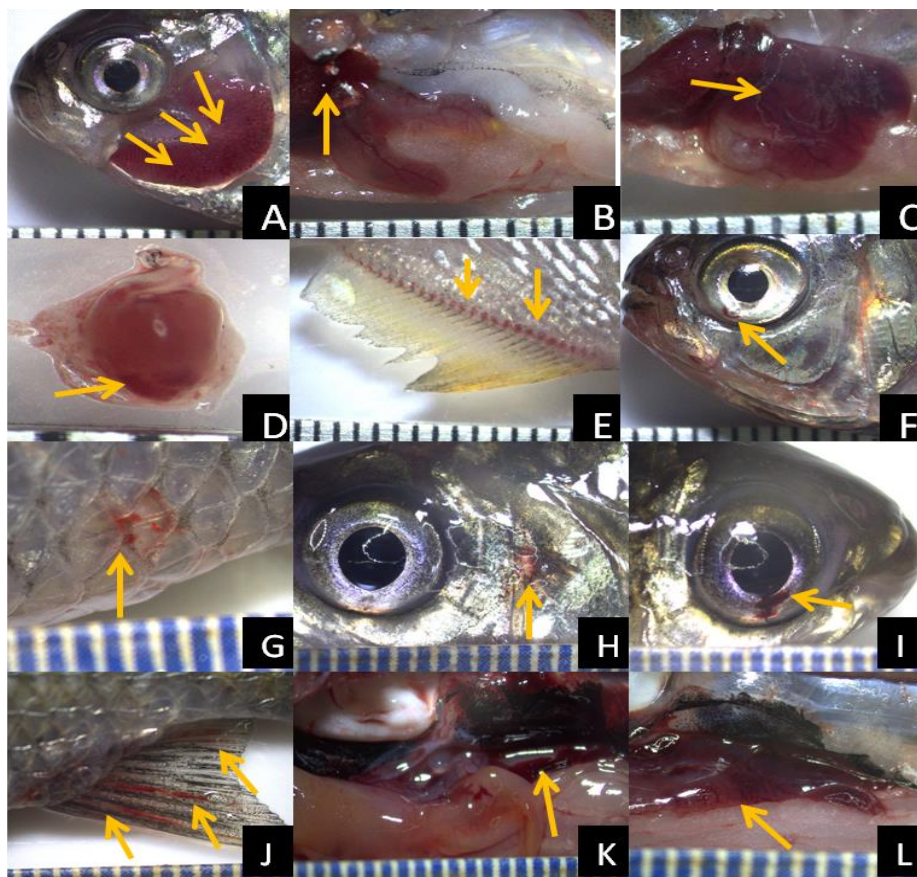
<b>VASOS HUPER.</b>	Veias	1,00 ± 0,82	6,6%	13,75 ± 0,50	91,6%	12,25 ± 2,07	81,6%	12,25 ± 3,10	81,6%	12,75 ± 2,63	85,0%
---------------------	-------	-------------	------	--------------	-------	--------------	-------	--------------	-------	--------------	-------

**Tabela 5.** Frequência de ocorrência de injúrias de acordo com os órgãos avaliados, M ±SD (média e desvio padrão) %M (percentual da média) em *P. vimbooides*.

<i>P. vimbooides</i>		RDC													
INJÚRIA	ORGÃO	0,96 M ± SD	% M	1,37 M ± SD	% M	1,78 M ± SD	% M	2,18 M ± SD	% M	2,56 M ± SD	% M	3,04 M ± SD	% M	3,43 M ± SD	% M
<b>HEMORRAGIA</b>	Pele	0	0%	0	0%	0,33± 0,52	6,6%	0,50 ± 0,84	10,0	0,83 ± 0,41	16,6	0,66 ± 1,21	13,2	0,33 ± 0,82	6,6%
	Olhos	0,16 ± 0,41	3,2%	1,17 ± 1,17	23,4	1,83 ± 1,84	36,6	1,83 ± 1,95	36,6	1,67 ± 1,64	33,4	1,83 ± 0,99	36,6	2,50 ± 1,88	50,0
	Nadadeiras	0	0%	0,17 ± 0,41	3,4%	0,50 ± 0,55	10,0	0,83 ± 0,76	16,6	0,67 ± 1,04	13,4	1,17 ± 0,76	23,4	2,33 ± 1,21	46,6
	Opérculo	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0,17 ± 0,41	3,4%	0	0%
	Brânquias	0	0%	0,33 ± 0,52	6,6%	0,33 ± 0,52	6,6%	0,33 ± 0,52	6,6	0,33 ± %	6,6%	0,17 ± 0,41	3,4%	0	0%
	Coração	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	Vísceras	3,50 ± 1,23	70,0	4,33 ± 0,82	86,6	3,33 ± 1,64	66,6	2,00 ± 1,42	40,0	3,45 ± 1,42	69%	3,83 ± 0,99	76,6	4,33 ± 0,82	86,6
	Bexiga Natatória	0	0%	0	0%	0	0%	0,33 ± 0,82	6,6	0,17 ± 0,41	3,4%	0	0%	0	0%
Fígado	0	0%	1,00 ± 0,64	20,0	1,67 ± 1,21	33,4	2,00 ± 0,90	40,0	1,5 ± 0,84	30,0	1,17 ± 0,75	23,4	1,83 ± 1,72	36,6	
<b>EMBOLIA</b>	Pele	0	0%	0,83 ± 1,17	16,6	0,33 ± 0,82	6,6%	0	0	0,33 ± 0,82	6,6%	0,83 ± 1,17	16,6	0	0%
	Olhos	0,83 ± 0,75	16,6	0	0%	0,16 ± 0,41	3,2%	0,50 ± 0,55	10,0	0,17 ± 0,41	3,4%	0	0%	0,83 ± 0,76	16,6
	Nadadeiras	5,00 ± 0	100,0	4,83 ± 0,41	96,6	4,16 ± 1,17	83,2	4,83 ± 0,41	96,6	4,17 ± 1,17	83,4	4,83 ± 0,41	96,6	5,00 ± 0	100,0
	Opérculo	0	0%	0,33 ± 0,82	6,6%	0,17 ± 0,41	3,4%	0	0%	0,17 ± 0,41	3,4%	0,33 ± 0,82	6,6%	0	0%
	Brânquias	0	0%	0,33 ± 0,84	6,6%	0,50 ± 0,84	10,0	0,33 ± 0,52	6,6	0,50 ± 0,84	10,0	0,33 ± 0,82	6,6%	0	0%
	Coração	4,17 ± 0,98	83,4	3,83 ± 0,98	76,6	4,00 ± 1,10	80,0	4,00 ± 1,27	80,0	4 ± 1,10	80,0	3,83 ± 0,99	76,6	4,17 ± 0,99	83,4
	Vísceras	3,50 ± 0,84	70%	2,33 ± 1,50	46,6	0,66 ± 0,52	13,2	1,17 ± 1,61	23,4	0,67 ± 0,52	13,4	2,33 ± 1,50	46,6	3,5 ± 0,84	70,0
<b>TRAUMA</b>	Pele	0	0%	0,17 ± 0,41	3,4%	0,33 ± 0,52	6,6%	0	0%	0,17 ± 0,41	3,4%	0,17 ± 0,41	3,4%	0,17 ± 0,41	3,4%
	Olhos	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0	0%	
	Nadadeiras	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0	0%	
	Opérculo	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0	0%	
<b>RUP. BEXIGA</b>	Bexiga	0	0%	4,33± 0,52	86,6	4,67 ± 0,82	93,4	4 ± 1,09	80,0	5 ± 0	100,0	5,00 ± 0	100,0	0	0%
<b>EXOFTALMIA</b>	Olhos	0	0%	0	0%	0	0%	0,17 ± 0,41	3,4	0,33 ± 0,52	6,6%	0,33 ± 0,52	6,6%	0	0%
<b>VASOS HUPER.</b>	Veias	3,16 ± 1,61	63,2	3,50 ± 1,05	70,0	3,67 ± 1,04	73,4	4,67 ± 0,52	93,4	4,33 ± 1,21	86,6	4,67 ± 0,52	93,4	4,67 ± 0,82	93,4

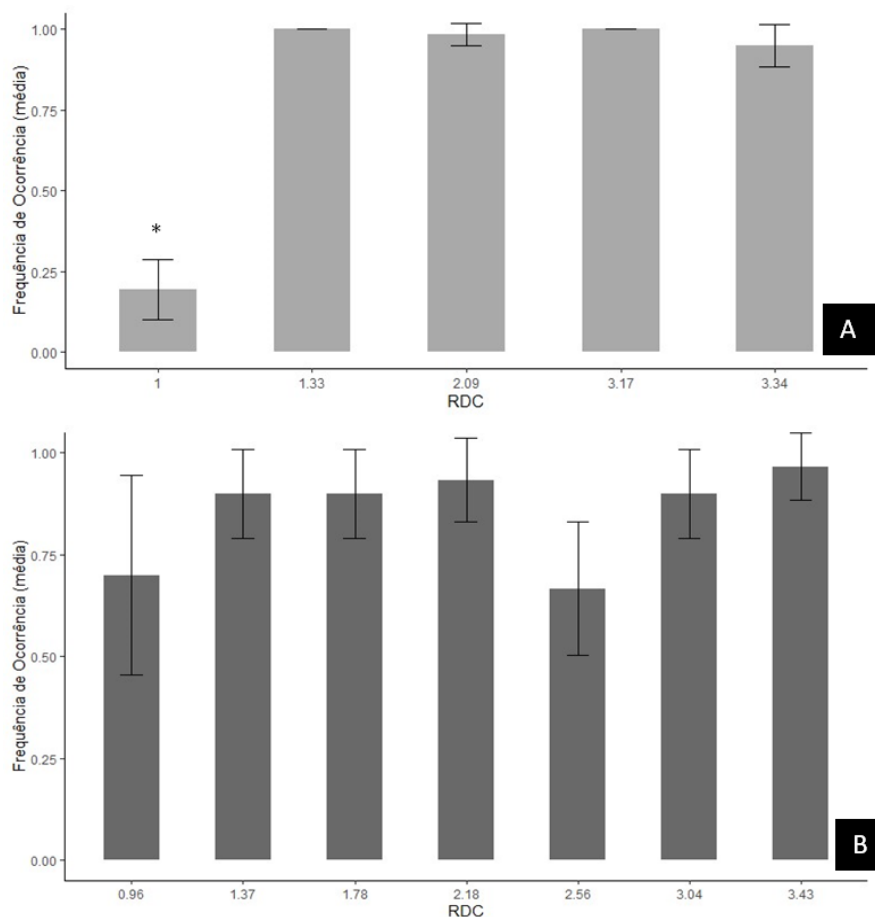
### Hemorragia

Em *A. cf bimaculatus*, as hemorragias estavam presentes em 248 indivíduos (83%) dos 300 animais testados. *P. vimbooides*, 179 indivíduos (85%) dos 210 indivíduos testados apresentaram hemorragias. Na Fig. 10 observamos a ocorrência de hemorragia em órgãos externos e internos, variando a intensidade de acordo com a RDC.



**Figura 10.** Hemorragias observadas em *A. cf. bimaculatus* (A-F) e *P. vimboides* (G-L) após a descompressão. (Fonte: arquivo pessoal)

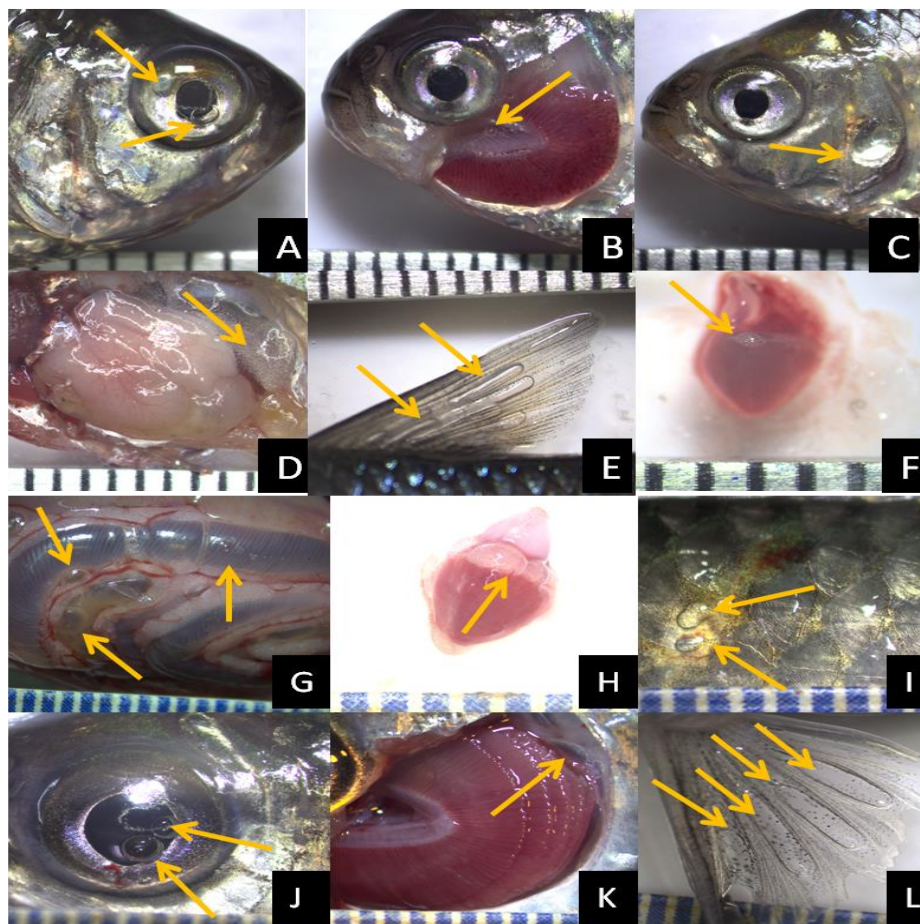
À exceção do grupo controle, para todas as demais RDC a frequência de ocorrência de hemorragia foi superior à 95% dos indivíduos, sendo diferente estatisticamente do grupo controle (Kruskal-Wallis,  $p < 2.2e-16$ ) (Fig. 11A). Para *P. vimboides*, sendo observadas frequências superiores em 60% dos indivíduos para todas as RDC, sem que tenham sido observadas diferenças significativas entre as RDC (Kruskal-Wallis,  $p = 0.052813$ ) (Fig. 11B). Em *P. vimboides* não houve relação entre RDC e hemorragia.



**Figura 11.** Frequência decorrência de hemorragias em A) *Astyanax cf bimaculatus* e B) *Prochilodus vimboides* em diferentes razões de decompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

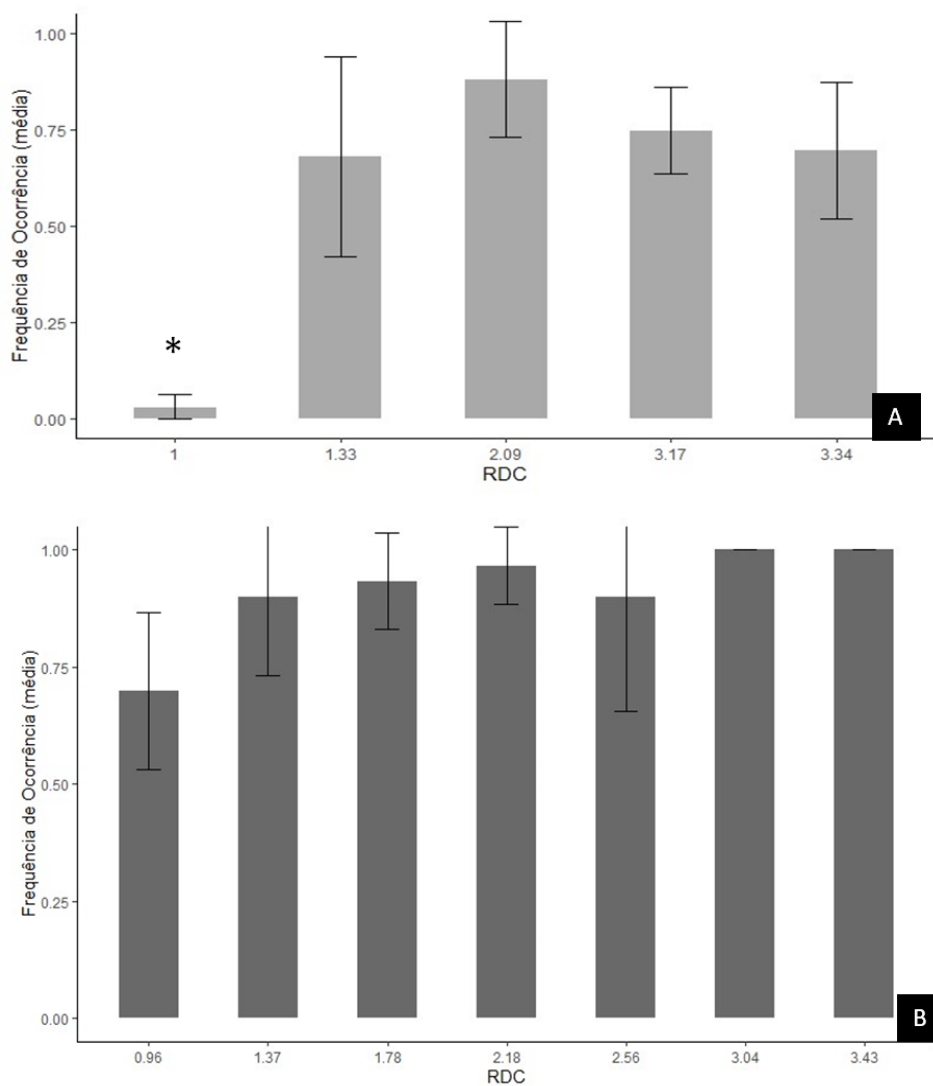
### *Embolia*

As embolias em *A. cf bimaculatus* estavam presentes em 183 indivíduos (61%) dos 300 animais testados. Na Fig. 12 observamos a ocorrência de embolias em órgãos externos e internos. Em ambas as espécies foi possível observar a formação de embolias nos órgãos, variando os locais de acordo com a espécie e a frequência de indivíduos acometidos.



**Figura 12-** Embolias observadas em *A. cf bimaculatus* (A-F) e *P. vimboides* (G-L) após a descompressão. (Fonte: arquivo pessoal)

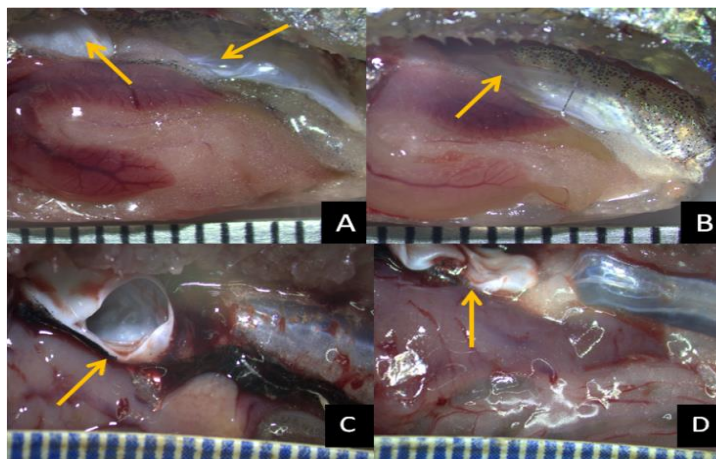
A frequência de ocorrência de embolia foi superior à 70% dos indivíduos, apenas o grupo controle, foi diferente estatisticamente das demais RDC (Kruskal-Wallis,  $p < 2.2 \times 10^{-16}$ ) (Fig. 13A). Em *P. vimboides*, 192 dos indivíduos (91%) dos 210 indivíduos testados apresentaram embolias, sendo observadas frequências superiores em 70% dos animais testados, para quase todas as RDC, no grupo controle foram observadas diferenças significativas entre as RDC (Kruskal-Wallis,  $p = 0.0004349$ ) (Fig. 13B).



**Figura 13.** Frequência de ocorrência de embolias em A) *Astyanax cf. bimaculatus* e B) *Prochilodus vimboides* em diferentes razões de descompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

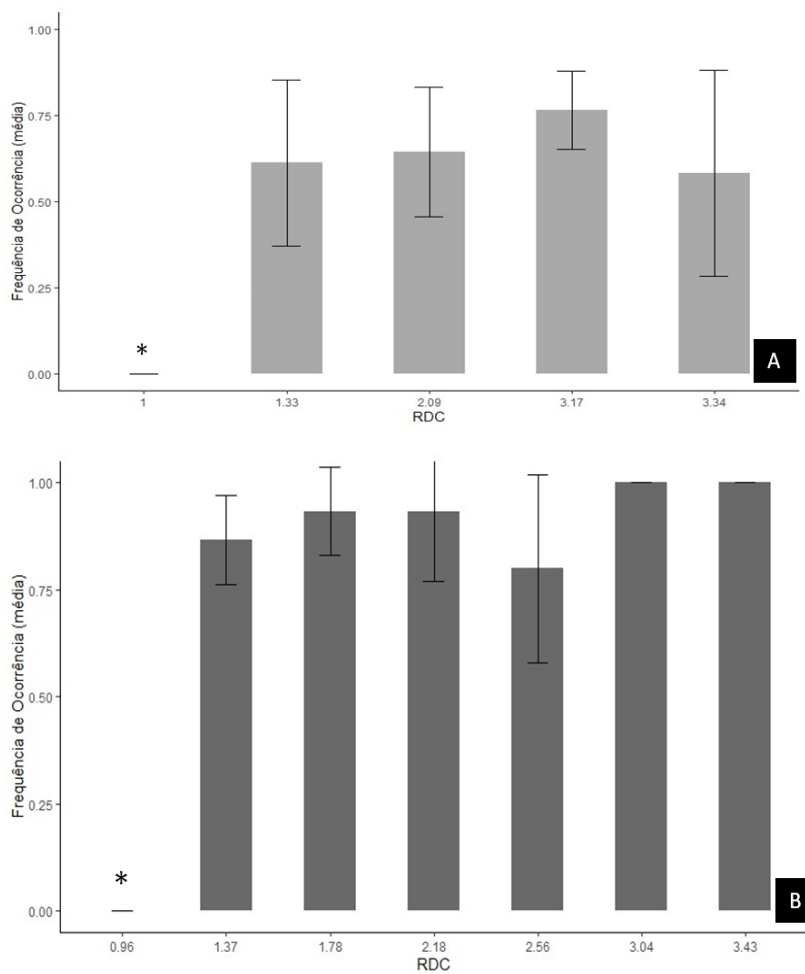
### *Ruptura da bexiga*

*A. cf. bimaculatus* apresentou ruptura da bexiga natatória em 142 dos indivíduos (47%) dos 300 animais testados. Na Fig. 14 observamos a ocorrência da ruptura da bexiga natatória nas duas espécies. Ambas espécies possuem bexiga natatória câmara dupla, durante os experimentos a ruptura ocorreu tanto em uma como nas duas câmaras.



**Figura 14.** Ruptura de bexigas observadas em *A. cf. bimaculatus* (A-B) e *P. vimboides* (C-D) após a descompressão. (Fonte: arquivo pessoal)

À exceção do grupo controle, para todas as demais RDC a frequência de ocorrência de ruptura de bexiga foi superior à 55% dos indivíduos, sendo diferente, estatisticamente no grupo controle em função das demais razões de descompressão (Kruskal-Wallis,  $p < 2.2e-16$ ) (Fig. 15A).

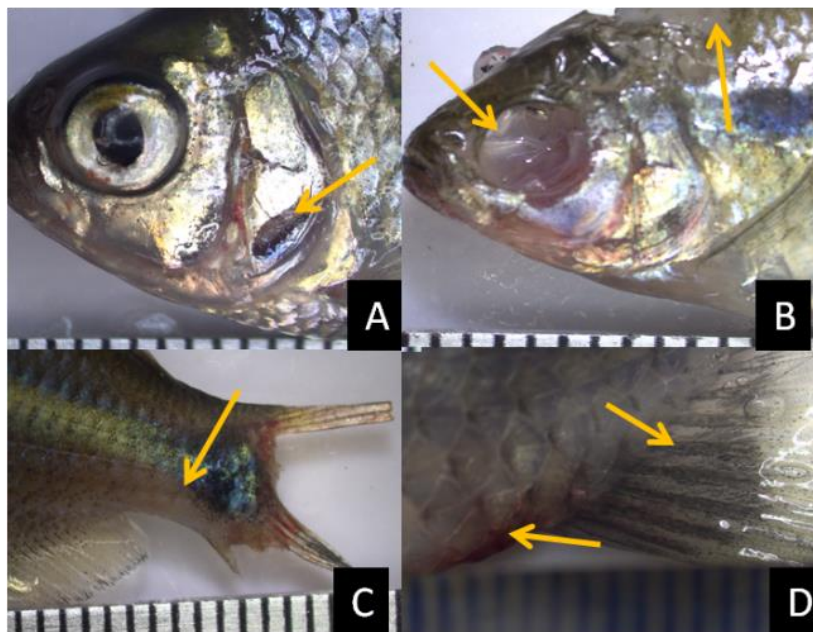


**Figura 15.** Frequência de ocorrência de rupturas da bexiga, A) *Astyanax cf bimaculatus* e B) *Prochilodus vimbooides* em diferentes razões de descompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

Já para *P. vimbooides*, 166 indivíduos (79%) dos 210 indivíduos testados apresentaram ruptura de bexiga, sendo observadas que frequências nas RDC foram superiores em 80% dos indivíduos, apenas no grupo controle foi observada diferenças significativas entre as demais RDC (Kruskal-Wallis,  $p < 2.2e-16$ ) (Fig. 15B).

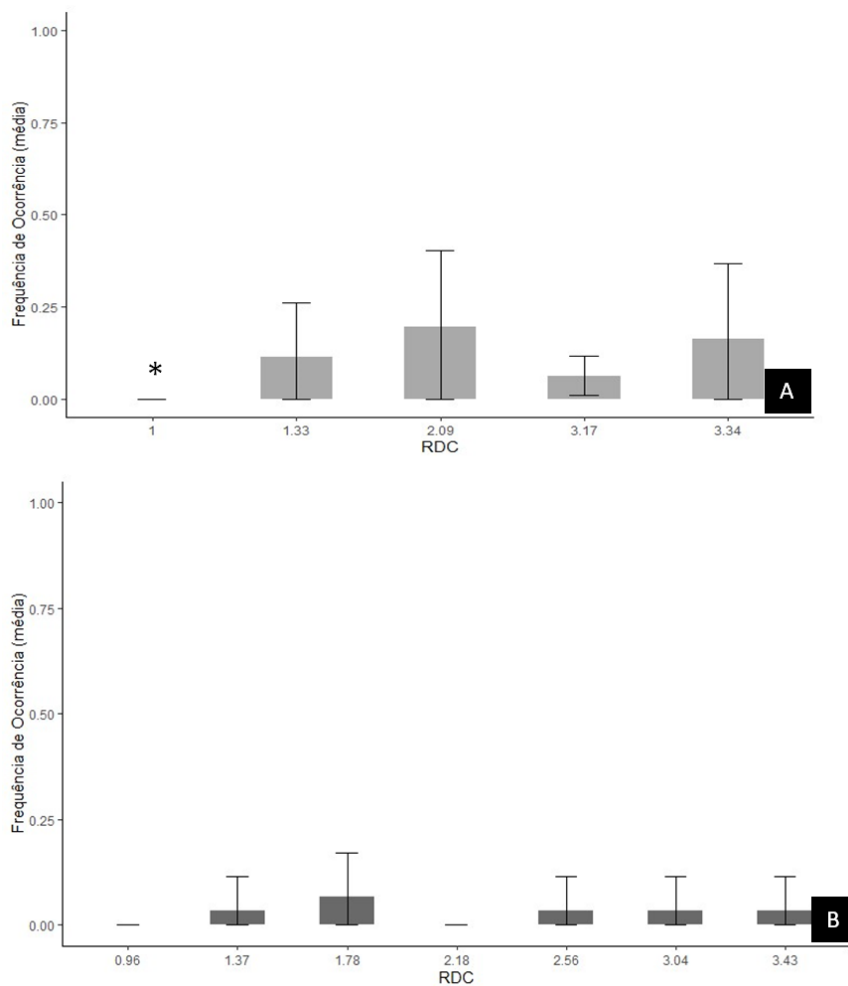
### Trauma

Em *A. cf bimaculatus*, os traumas estavam presentes em 33 indivíduos (11%) dos 300 animais testados, e para *P. vimbooides*, 16 indivíduos (8%) dos 210 indivíduos testados apresentaram traumas em ambas as espécies, ocorreram as injúrias de traumas (Fig. 16)



**Figura 16.** Traumas observados em *A. cf bimaculatus* (A-C) e *P. vimbooides* (D) após a descompressão. (Fonte: arquivo pessoal)

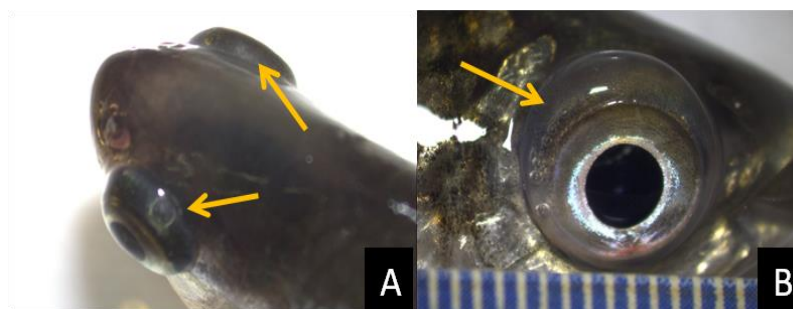
As RDC apresentaram a ocorrência de traumas, sendo diferente, estatisticamente apenas no grupo controle (Kruskal-Wallis,  $p = 0.003812$ ) (Fig. 17A). Em *P. vimbooides* foram observadas frequências abaixo de 15% dos indivíduos em todas as RDC, não foram observadas diferenças significativas (Kruskal-Wallis,  $p = 0.7552$ ) (Fig. 17B).



**Figura 17.** Frequência de ocorrência de traumas, A) *Astyanax cf bimaculatus* e B) *Prochilodus vimbooides* em diferentes razões de descompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

### *Exoftalmia*

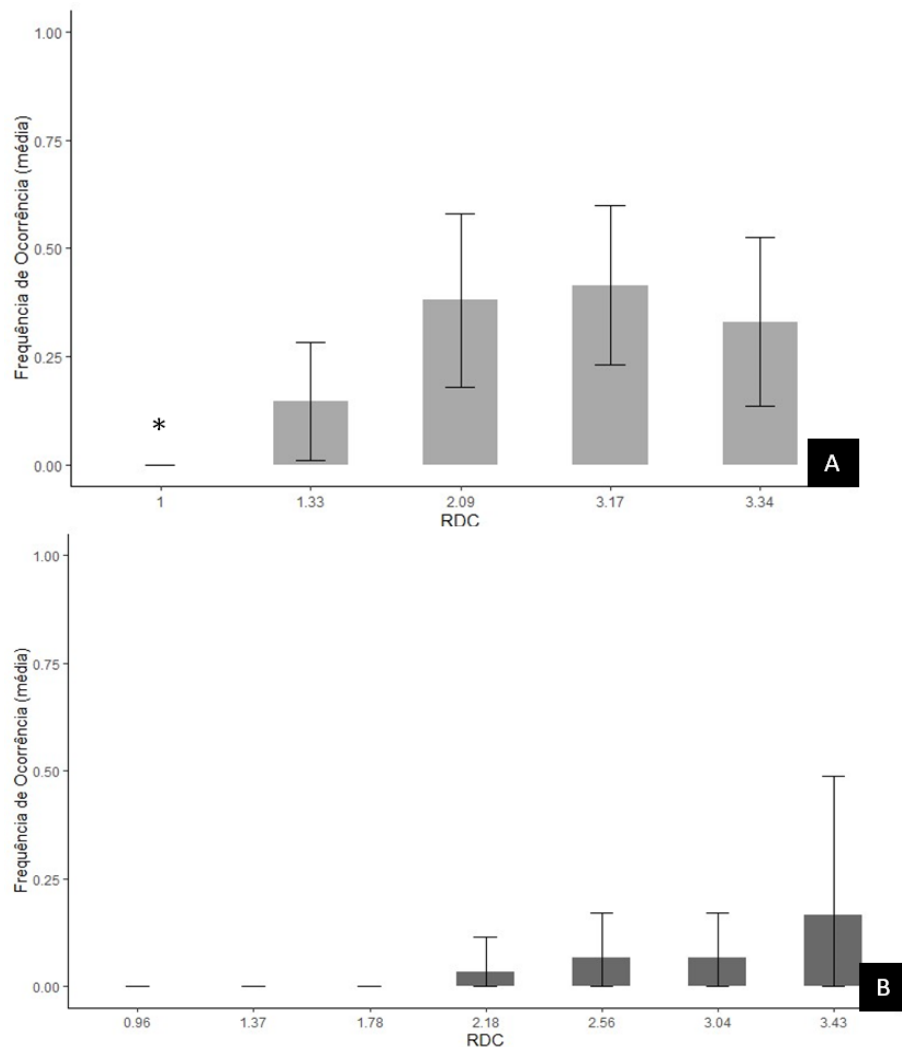
A frequência média de exoftalmia em *A. cf bimaculatus* em 77 indivíduos (25%) dos 300 animais testados e *P. vimbooides*, 10 indivíduos (5%) dos 210 peixes testados, apresentaram exoftalmia (Fig. 18).



**Figura 18.** Exoftalmias observadas em *A. cf bimaculatus* (A) e *P. vimbooides* (B) após a descompressão. (Fonte: arquivo pessoal)



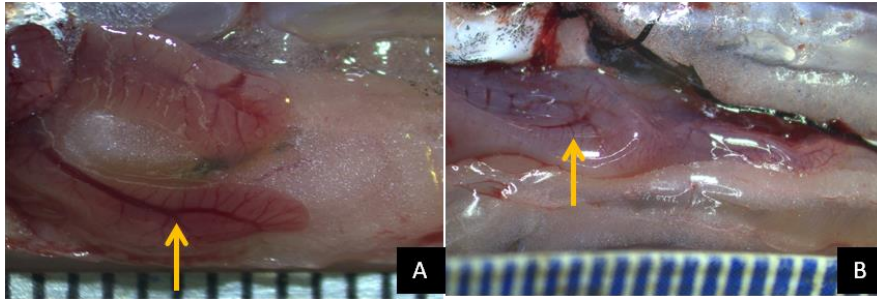
As RDC apresentaram com frequência a ocorrência de exoftalmia, foi entre 15% dos indivíduos e 35% dos indivíduos, sendo diferente estatisticamente apenas o grupo controle (Kruskal-Wallis,  $p = 6.612e-08$ ) (Fig. 19A). Para *P. vimboides* os indivíduos testados que apresentaram exoftalmia, foram observadas frequências até 15% dos indivíduos para as RDC, não foram observadas diferenças significativas (Kruskal-Wallis,  $p = 0.7552$ ) (Fig. 19B).



**Figura 19.** Frequência de ocorrência de exoftalmia, A) *Astyanax cf bimaculatus* e B) *Prochilodus vimboides* em diferentes razões de descompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

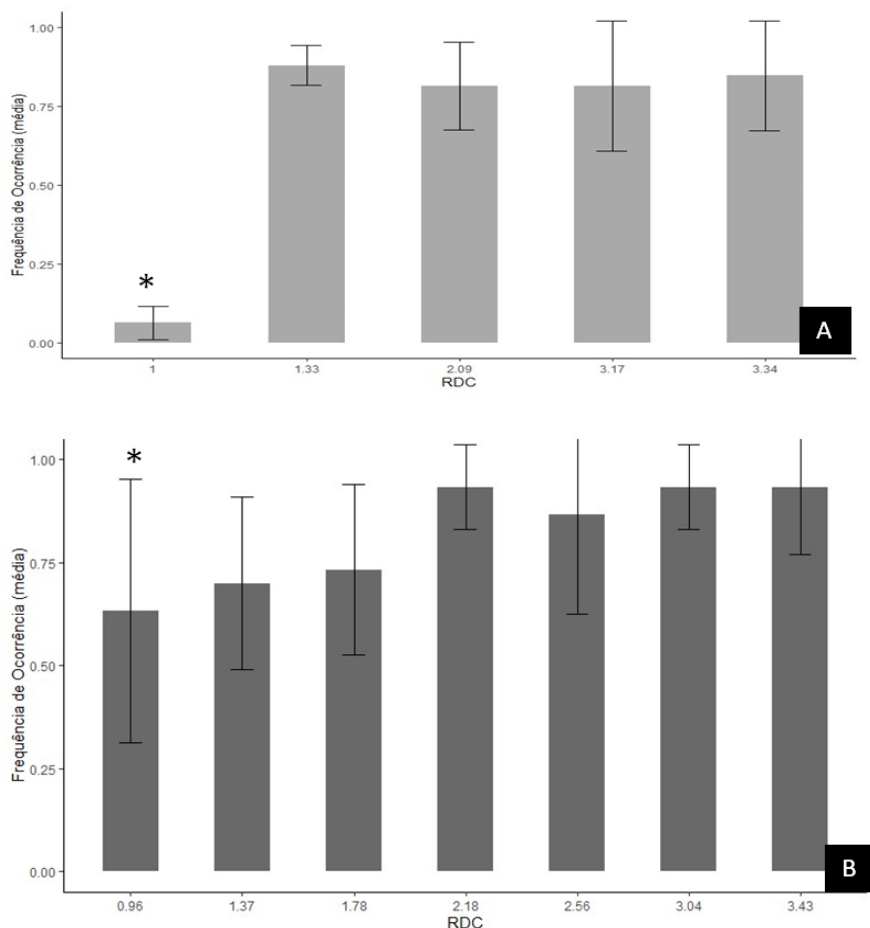
### Vasos hipertrofiados

Em *A. cf bimaculatus*, a frequência média de vasos hipertrofiados estavam presentes em 206 indivíduos (68%) dos 300 animais testados. Para *P. vimboides*, 172 indivíduos (82%) dos 210 indivíduos testados apresentaram vasos hipertrofiados (Fig. 20).



**Figura 20.** Vasos hipertrofiados observados em *A. cf bimaculatus* (A) e *P. vimbooides* (B) após a descompressão. (Fonte: arquivo pessoal)

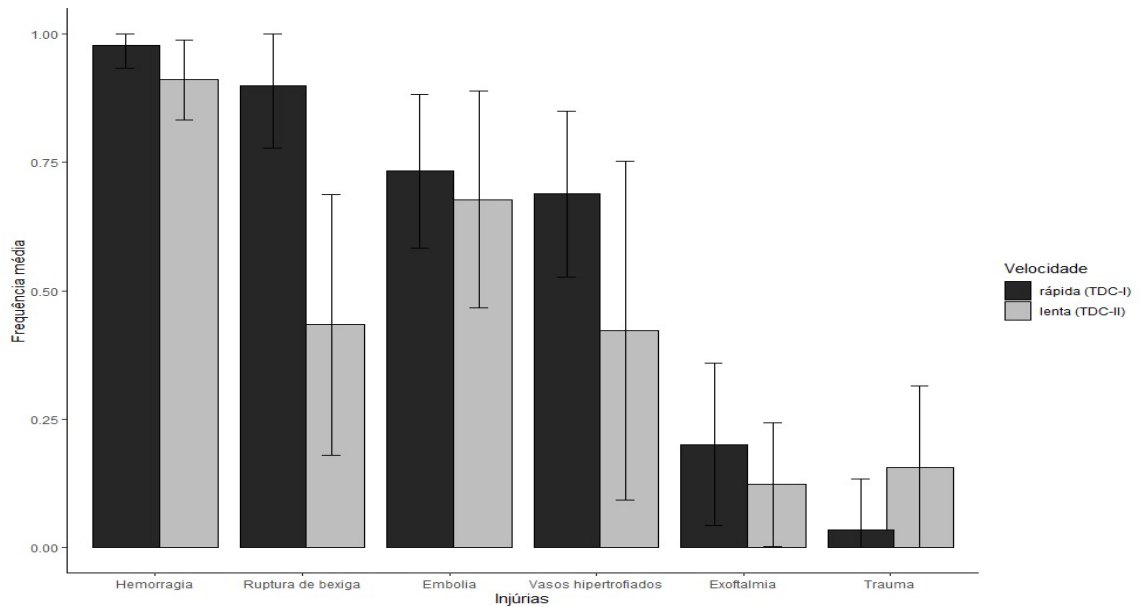
Nas RDC a frequência de ocorrência de vasos hipertrofiados foi superior à 75%, dos indivíduos, sendo o grupo controle diferente estatisticamente (Kruskal-Wallis,  $p < 2.2e-16$ ) (Fig. 21A). E em *P. vimbooides*, foram observadas frequências superiores em 60% dos indivíduos em quase todas as RDC, apenas no grupo controle foi observada diferenças significativas (Kruskal-Wallis,  $p = 0.003217$ ) (Fig. 21B).



**Figura 21.** Frequência de ocorrência de vasos hipertrofiados, A) *Astyanax cf bimaculatus* e B) *Prochilodus vimbooides* em diferentes razões de descompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

## 4. 2 Avaliação das diferentes Taxas de descompressão (TDC)

Um total de 210 indivíduos de *A. cf bimaculatus* foram submetidos a diferentes TDC (controle, TDC-I e TDC-II), destes 189 (90%) dos indivíduos apresentaram algum tipo de injúria (hemorragia, embolia, trauma, ruptura de bexiga, exoftalmia, vasos hipertrofiados) (Fig. 22).

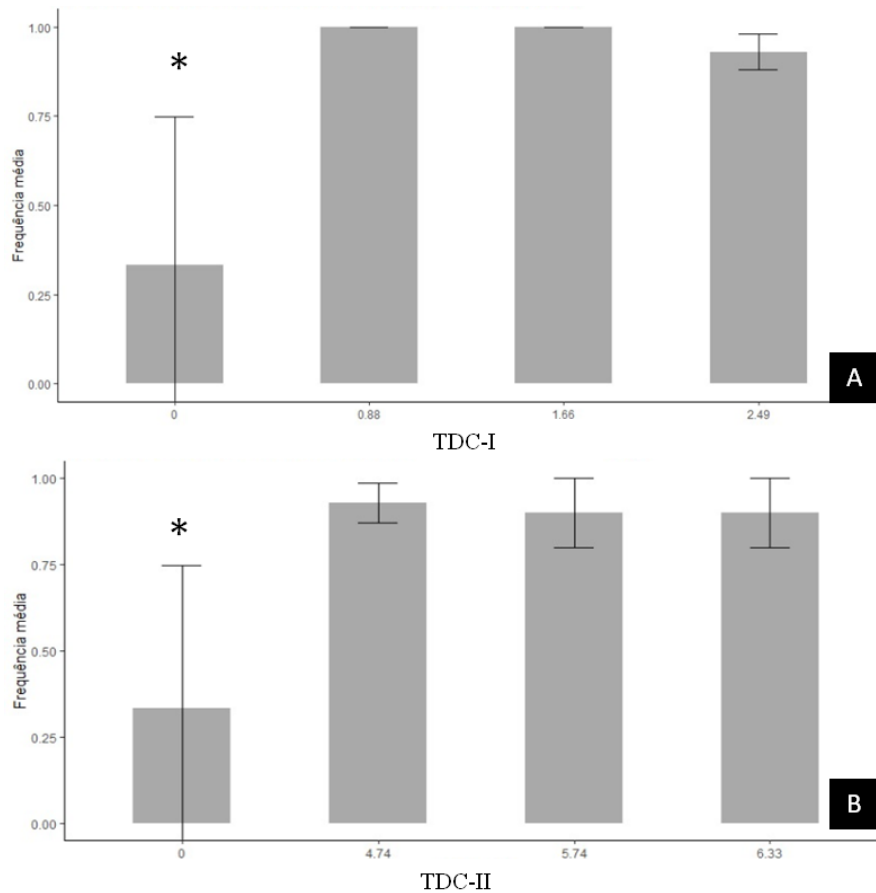


**Figura 22-** Principais injúrias observadas nas espécies *A. cf bimaculatus*.

### TDC-I VS TDC-II

Na TDC-I o tempo de descompressão teve uma variação média de 0.88 segundos a 2.49 segundos e na TDC-II o tempo de descompressão ficou entre 4.7 segundos a 6.3

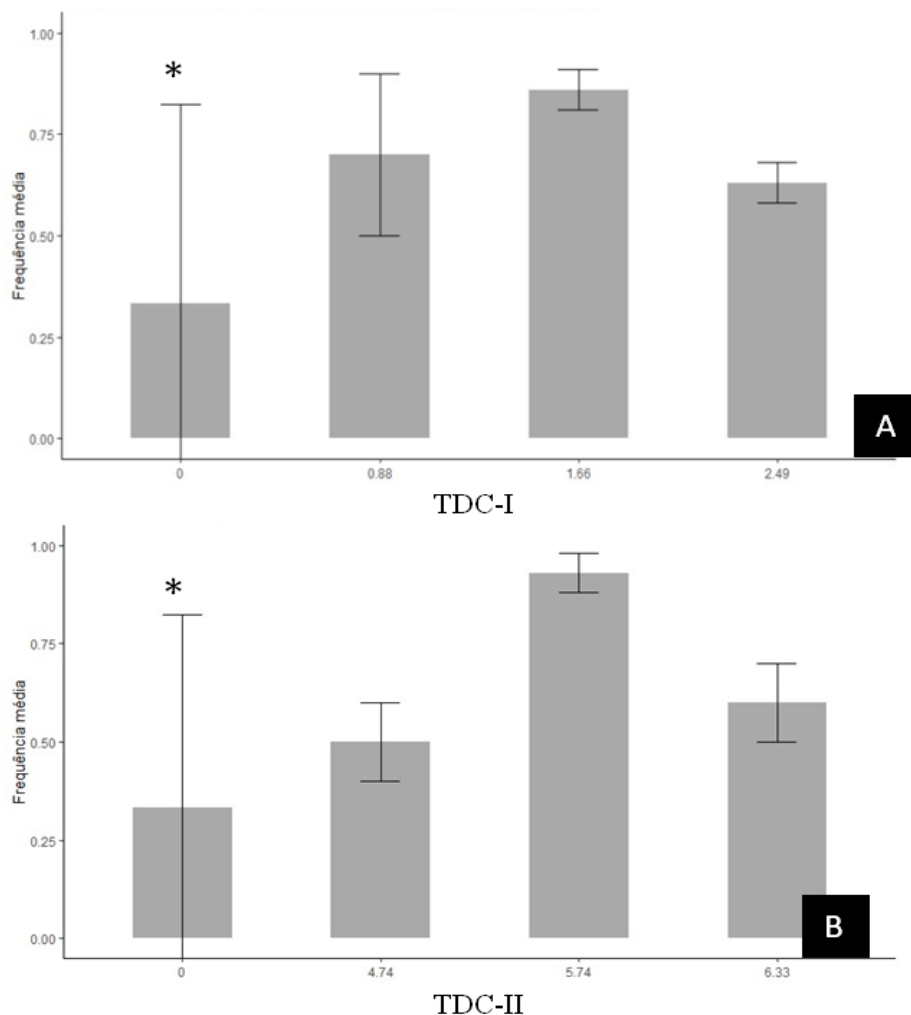
segundos. Ao comparar as TDC-I e TDC-II, observou diferença significativa no grupo controle (Kruskal-Wallis,  $p$ -value =  $2.34e-05$ ). Na TDC-I, as **hemorragias** estavam presentes em 88 indivíduos (98%) dos 90 animais testados. À exceção do grupo controle, as demais TDC a frequência de ocorrência de hemorragia foi superior à 90%, dos indivíduos, e estatisticamente diferente do grupo controle (Kruskal-Wallis,  $p= 1.398e-08$ ) (Fig. 23A). Para a TDC-II, 82 (91%) dos 90 indivíduos testados apresentaram hemorragias, sendo observadas frequências superiores a 85% dos indivíduos em quase todas as TDC, apenas o grupo controle apresentou uma diferença significativa, na TDC-II (Kruskal-Wallis,  $p= 1.5396e-06$ ) (Fig. 23B).



**Figura 23.** Frequência de ocorrência de hemorragia, A) TDC-I e B) TDC-II em diferentes taxas de decompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

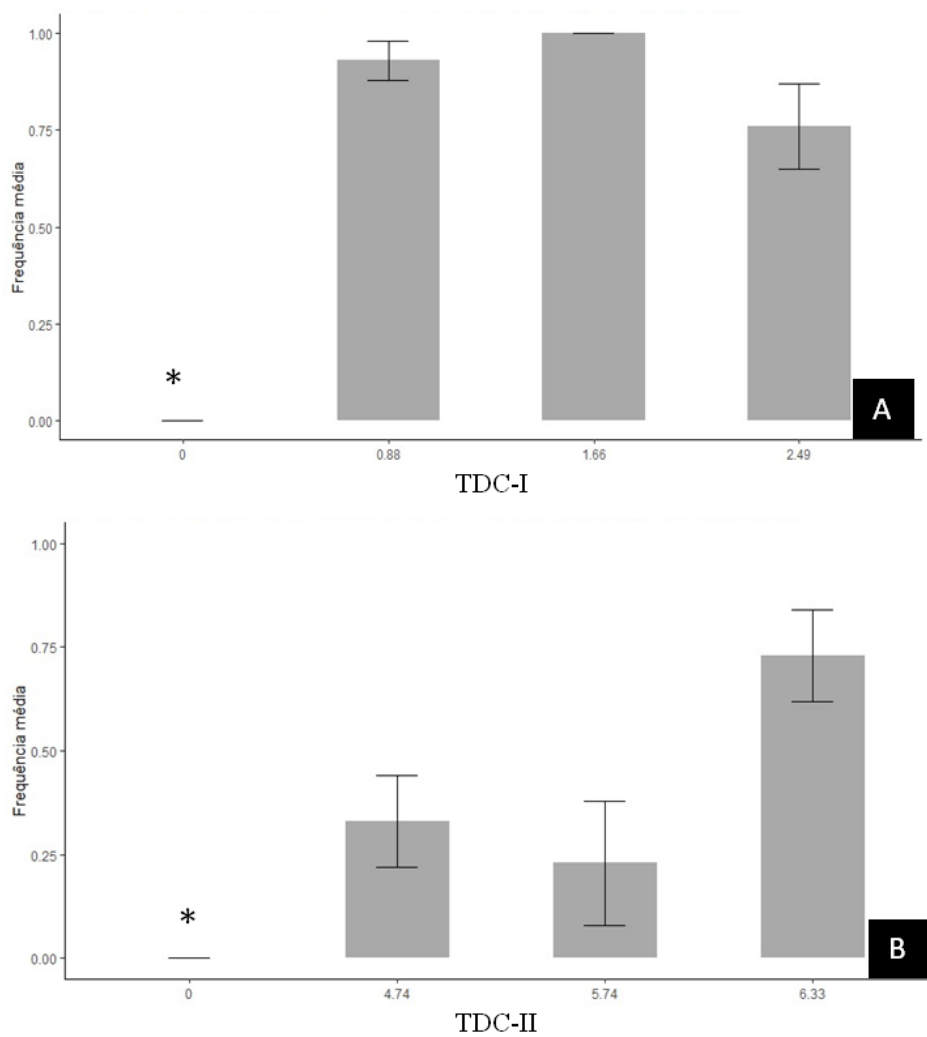
Na TDC-I, as **embolias** estavam presentes em 66 indivíduos (73%) dos 90 animais testados. A frequência de ocorrência de hemorragia nas TDC foi superior à 65% dos indivíduos, sendo estatisticamente diferente do grupo controle (Kruskal-Wallis,  $p= 0.006942$ ) (Fig. 24A). Para a TDC-II, 61 dos indivíduos (68%) dos 90 indivíduos testados

apresentaram embolias, sendo observadas frequências superiores a 50% dos indivíduos nas TDC, apenas o grupo controle que apresentou uma diferença significativa (Kruskal-Wallis,  $p= 0.0022112$ ) (Fig. 24B).



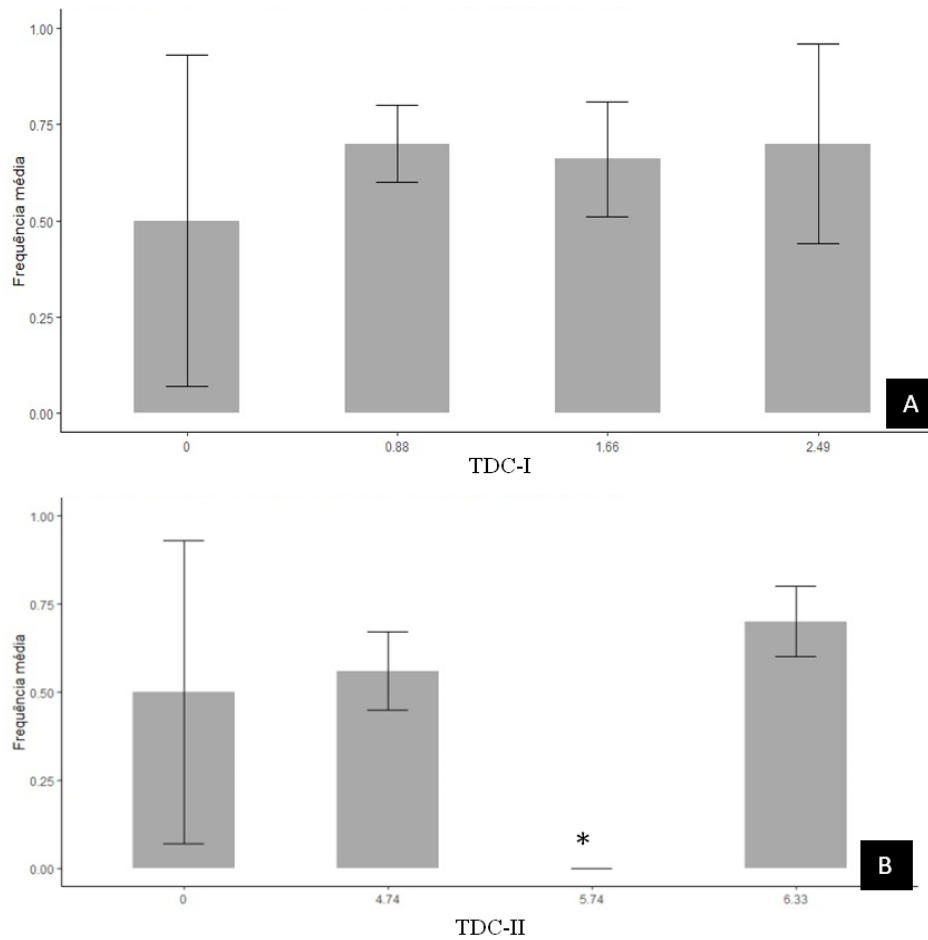
**Figura 24.** Frequência de ocorrência de embolias. A) TDC-I e B) TDC-II em diferentes taxas de decompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

**A ruptura da bexiga** na TDC-I, esteve presente em 81 indivíduos (90%) dos 90 animais testados. A frequência de ocorrência de hemorragia nas TDC foi superior à 75% dos indivíduos, sendo estatisticamente diferente do grupo controle (Kruskal-Wallis,  $p= 7.151e-10$ ) (Fig. 25A). Para a TDC-II, 39 (43%) dos 90 indivíduos testados apresentaram ruptura da bexiga, sendo observadas frequências entre 20% dos indivíduos e 75% dos indivíduos nas TDC, o grupo controle apresentou uma diferença significativa (Kruskal-Wallis,  $p= 4.5431e-08$ ) (Fig. 25B).



**Figura 25.** Frequência de ocorrência de ruptura da bexiga. A) TDC-I e B) TDC-II em diferentes taxas de decompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

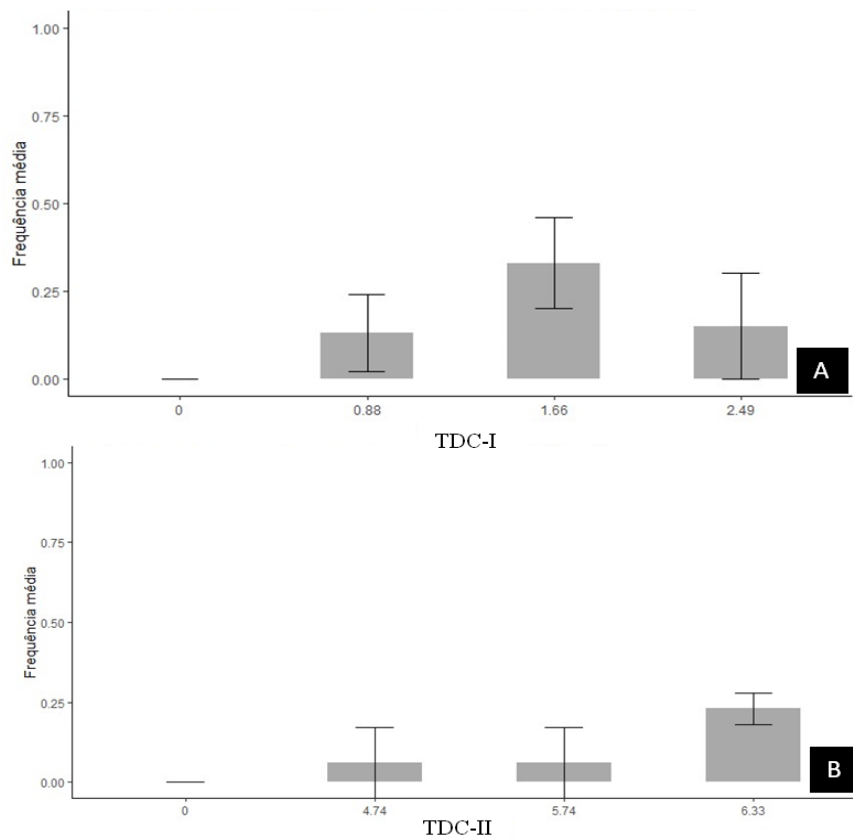
**Os vasos hipertrofiados** na TDC-I estiveram presentes em 62 indivíduos (69%) dos 90 animais testados, sendo observadas frequências superiores a 50% dos indivíduos para todas as TDC, não foram observadas diferenças significativas entre as TDC (Kruskal-Wallis,  $p= 0.1495$ ) (Fig. 26A). Para a TDC-II, 38 indivíduos (42%) dos 90 indivíduos testados apresentaram vasos hipertrofiados, sendo observadas frequências superiores a 50% dos indivíduos, a TDC (5.74s) apresentou uma diferença significativa em relação as demais (Kruskal-Wallis,  $p= 0.048954$ ) (Fig. 26B).



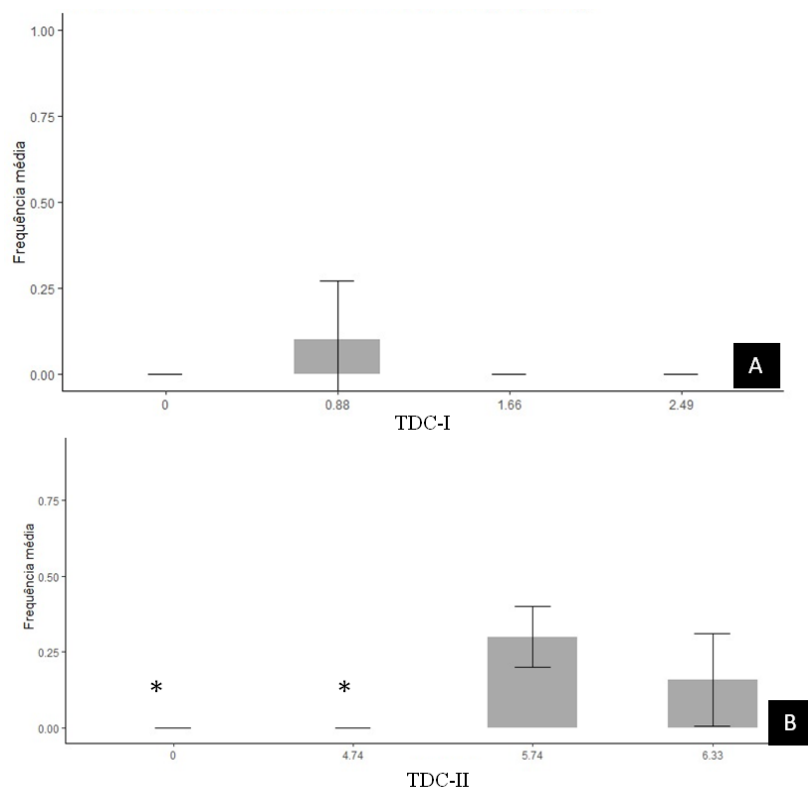
**Figura 26.** Frequência de ocorrência de vasos hipertrofiados. A) TDC-I e B) TDC-II em diferentes taxas de decompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.

Na TDC-I, a **exoftalmia** esteve presente em 18 indivíduos (20%) dos 90 animais testados, sendo observadas frequências entre 10% dos indivíduos e 30% dos indivíduos para as TDC. Não foram observadas diferenças significativas entre as TDC (Kruskal-Wallis,  $p=0.08904$ ) (Fig. 27A). Para a TDC-II, 39 indivíduos (42%) dos 90 indivíduos testados apresentaram exoftalmia, as frequências não passaram de 20% dos indivíduos. Não foram observadas diferenças significativas entre as TDC, semelhante à TDC-I (Kruskal-Wallis,  $p=0.08904$ ) (Fig. 27B).

Na TDC-I, o **trauma** esteve presente em 3 indivíduos (3%) dos 90 animais testados, não foram observadas diferenças significativas entre as TDC (Kruskal-Wallis,  $p=0.08904$ ) (Fig. 28A). Para a TDC-II, 14 indivíduos (15%) dos 90 indivíduos testados apresentaram a ocorrência de trauma, foram observadas diferenças significativas nas TDC (4.74 e no grupo controle), em relação as demais (Kruskal-Wallis,  $p=0.0023708$ ) (Fig. 28B).



**Figura 27.** Frequência de ocorrência de exoftalmia. A) TDC-I e B) TDC-II em diferentes taxas de



descompressão.

**Figura 28.** Frequência de ocorrência de trauma. A) TDC-I e B) TDC-II em diferentes taxas de descompressão. (\*) indica o grupo que apresentou diferença significativa em relação aos demais.



Os órgãos mais afetados, foram analisados, conforme registros na tabela 6, com a frequência média de ocorrência e seus percentuais. Ao analisar os órgãos afetados pela hemorragia, 57% dos indivíduos foram afetados na TDC-I e na TDC-II. Já nas brânquias 54% dos indivíduos foram afetados na TDC-I e a hemorragia nas vísceras ficou em torno de 42% dos indivíduos (TDC-I) e 48% dos indivíduos (TDC-II). Para embolia os valores não passaram de 45% dos indivíduos, nas nadadeiras e 34% dos indivíduos, no coração. A bexiga foi rompida foram 90% dos indivíduos na TDC-I e 54% dos indivíduos na TDC-II, com vasos hipertrofiados foram 68% dos indivíduos e 62% dos indivíduos respectivamente.

**Tabela 6.** Frequência de ocorrência de injúrias de acordo com os órgãos avaliados, M  $\pm$  SD (média e desvio padrão) %M (percentual da média) em *A. cf. bimaculatus*

<i>A. cf. bimaculatus</i>		Taxa de descompressão					
INJÚRIA	ORGÃO	TDC-I		TDC-II		CONTROLE	
		M $\pm$ SD	% MÉDIA	M $\pm$ SD	% MÉDIA	M $\pm$ SD	% MÉDIA
HEMORRAGIA	Pele	0	0%	0,11 $\pm$ 0,33	1,1%	0	0%
	Olhos	5,78 $\pm$ 2,63	57,8%	5,89 $\pm$ 1,83	58,9%	0,33 $\pm$ 0,57	3,3%
	Nadadeiras	1,33 $\pm$ 1,50	13,3%	4,11 $\pm$ 2,42	41,1%	2,00 $\pm$ 3,46	20%
	Opérculo	1,88 $\pm$ 0,61	18,8%	2,22 $\pm$ 1,65	22,2%	2,00 $\pm$ 3,46	20%
	Brânquias	5,44 $\pm$ 3,67	54,4%	0,11 $\pm$ 0,33	1,1%	0,33 $\pm$ 0,57	3,3%
	Coração	0	0%	0	0%	0	0%
	Vísceras	4,22 $\pm$ 3,15	42,2%	4,89 $\pm$ 1,83	48,9%	0,66 $\pm$ 1,15	6,6%
	Bexiga	0	0%	0	0%	0	0%
	Natatória						
	Fígado	5,11 $\pm$ 2,08	51,1%	4,33 $\pm$ 2,29	43,3%	0,33 $\pm$ 0,57	3,3%
EMBOLIA	Pele	0	0%	0	0%	0	0%
	Olhos	0,77 $\pm$ 0,83	7,7%	0,77 $\pm$ 0,83	7,7%	0,33 $\pm$ 0,57	3,3%
	Nadadeiras	4,55 $\pm$ 2,07	45,5%	1,55 $\pm$ 1,59	15,5%	0	0%
	Opérculo	0,33 $\pm$ 0,71	3,3%	0,22 $\pm$ 0,66	2,2%	0	0%
	Brânquias	0,22 $\pm$ 0,45	2,2%	0,11 $\pm$ 0,33	1,1%	0	0%
	Coração	3,44 $\pm$ 0,73	34,4%	4,00 $\pm$ 1,41	40,0%	0	0%
	Vísceras	1,11 $\pm$ 0,93	11,1%	1,11 $\pm$ 1,36	11,1%	0	0%
TRAUMA	Pele	0	0%	0	0%	0	0%
	Olhos	0	0%	0	0%	0	0%
	Nadadeiras	0	0%	0,37 $\pm$ 1,06	0%	0	0%
	Opérculo	0,33 $\pm$ 1,00	3,3%	0,25 $\pm$ 0,71	0%	0	0%
RUP. BEXIGA	Bexiga	9,00 $\pm$ 1,22	90,0%	5,44 $\pm$ 2,07	54,4%	0	0%
EXOFTALMIA	Olhos	2,00 $\pm$ 1,59	20,0%	1,33 $\pm$ 1,33	13,3%	0	0%
VASOS HIPER.	Veias	6,89 $\pm$ 1,62	68,9%	6,22 $\pm$ 2,49	62,2%	2,33 $\pm$ 4,04	23,3%

### 4.3 Avaliação da sobrevivência após variações rápidas de pressão

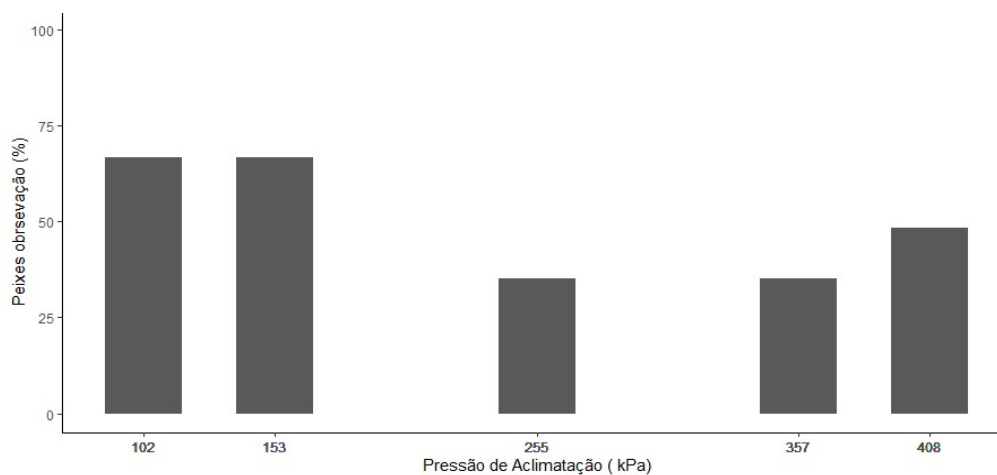
Um total de 300 indivíduos de *A. cf. bimaculatus* que foram submetidos a diferentes RDC, sendo que desses 151 indivíduos (50%) sobreviveram e foram acompanhados por 120 horas após a descompressão induzida (Tabela 7). Em RDC elevadas, o número de peixes acompanhados foi consideravelmente menor, em função das mortes registradas imediatamente após a descompressão. Dos 151 peixes que

sobreviveram à descompressão e foram acompanhados pelas 120h, nenhum veio a óbito durante o acompanhamento.

**Tabela 7:** Número de peixes observados 120 horas após a descompressão induzida.

Pressão de aclimação (kPa)	RDC	N	Peixes p/ observação	Óbitos após 120 horas	Percentual de peixes c/ injúrias
102	1,00	60	40	0	(0) 0%
153	1,33	60	40	0	(40) 100%
255	2,09	60	21	0	(21) 100%
357	3,17	60	21	0	(21) 100%
408	3,34	60	29	0	(28) 96%
<b>TOTAL</b>		300	151	0	

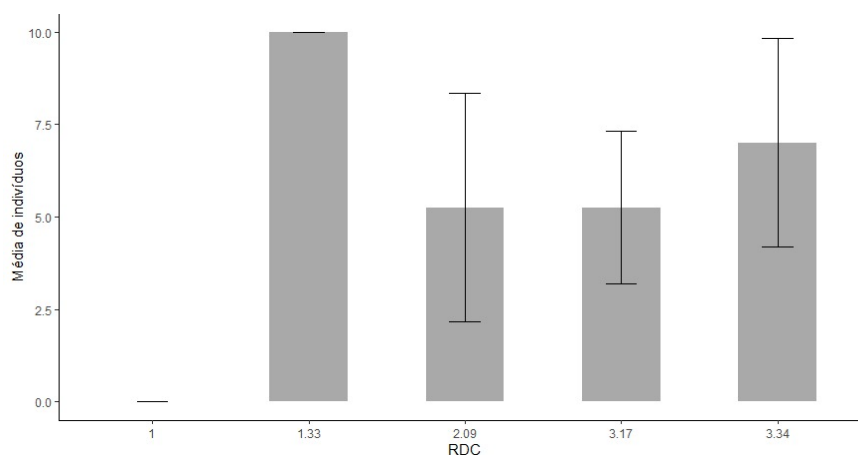
O percentual de peixes que foram considerados vivos e levados a observação por 120 horas, foi menor na pressão de aclimação de 408kPa em torno de 35% dos peixes que foram submetidos ao início ao procedimento, na pressão de aclimação 357 kPa em torno de 48% desses peixes. Nas demais pressões 102 kPa (grupo controle) e na 153 kPa foram 67% dos peixes levados a observação, número esse que era a base de indivíduos a serem observados, isso caso todos sobrevivessem ao processo de descompressão (Fig. 29).



**Figura 29-** Percentual de peixes levados para observação após a descompressão induzida.

Após as 120 horas, todos os peixes foram eutanasiados e autopsiados, onde foi possível perceber a ausência de injúrias no grupo controle. O registro de injúrias remanescentes após as 120h, para indivíduos expostos à RDC maiores que 1,0 (um), apresentou variações em função das RDC. Na RDC de 1.33, todos os indivíduos levados

a observação apresentaram injúrias, nas razões de descompressão 2.09, 3.17 e 3.34 a média de indivíduos com injúria ficou entre 5 indivíduos e 7 indivíduos (Fig. 30).



**Figura 30-** Média de peixes com injúrias 120 horas após a descompressão.

Dos 151 indivíduos eutanasiados após a observação por 120 horas, 108 indivíduos (71%) apresentaram hemorragia, 97 indivíduos (64%) tiveram vasos hipertrofiados, 61 indivíduos (40%) apresentaram embolia, 39 indivíduos (25%) tiveram ruptura da bexiga, 8 indivíduos (5%) apresentaram trauma, 1 indivíduo (0,6%) teve exoftalmia. Quando comparadas com as RDC, não houve diferenças significativas, exceto apenas para o grupo controle. A frequência média de injúrias nos órgãos, apenas vasos hipertrofiados (65%) dos indivíduos e hemorragia nas vísceras (50%) dos indivíduos foram os mais afetados (Tabela 8).

**Tabela 8:** Frequência média de injúrias nos órgãos 120 horas após a descompressão induzida.

<i>A. cf bimaculatus</i>		Taxa de incidência de lesões remanescentes	
INJÚRIA	ORGÃO	M ± SD	%
HEMORRAGIA	Pele	0,03 ± 0,16	3%
	Olhos	0,27 ± 0,45	27%
	Nadadeiras	0,44 ± 0,49	44%
	Opérculo	0,29 ± 0,45	29%
	Brânquias	0,32 ± 0,47	32%
	Coração	0,15 ± 0,36	15%
	Vísceras	0,50 ± 0,50	50%
	Bexiga Natatória	0,04 ± 0,20	4%
	Fígado	0,27 ± 0,45	27%
EMBOLIA	Pele	0	0%
	Olhos	0,01 ± 0,09	1%
	Nadadeiras	0%	0%
	Opérculo	0,01 ± 0,09	1%
	Brânquias	0,03 ± 0,16	3%
	Coração	0,22 ± 0,42	22%
	Vísceras	0,24 ± 0,43	24%
TRAUMA	Pele	0,02 ± 0,12	2%

	Olhos	0	0%
	Nadadeiras	0,01 ± 0,09	1%
	Opérculo	0,03 ± 0,18	3%
RUP. BEXIGA	Bexiga	0,26 ± 0,44	26%
EXOFTALMIA	Olhos	0,01 ± 0,09	1%
VASOS HIPER	Veias	0,65 ± 0,49	65%

## 5. DISCUSSÃO

O presente estudo avaliou a susceptibilidade ao barotrauma em diferentes razões de descompressão induzida, os efeitos de diferentes taxas de descompressão na incidência de injúrias em duas espécies neotropicais, o lambari (*A. cf bimaculatus*) e a grumatã (*P. vimboides*), bem como avaliou a capacidade de sobrevivência de *A. cf bimaculatus* após variações rápidas de pressão.

Nos resultados do presente estudo foram observadas trinta e uma ocorrências de lesões pontuadas para *A. cf bimaculatus* e vinte e seis para *P. vimboides*, com tipos diferentes de lesões, do que os observados por Kerr et al., 2023, com 20 e 22 tipos de lesões (Pacu, *Piaractus mesopotamicus*, e piracanjuba, *Brycon orbignyanus*). Marques (2017) observou injúrias nas brânquias, no coração, nos olhos, no fígado, no intestino, nas nadadeiras e na bexiga natatória, ao passo que no presente estudo foram observadas essas, além de lesões na pele, no opérculo. É através das lesões pontuadas, que observamos o quanto cada indivíduo sofreu durante o processo de descompressão, e a partir destas são contabilizados o grau de impacto de cada RDC, bem como geram dados para o banco de informações sobre cada espécie.

As injúrias foram agrupadas em seis tipos: hemorragia, embolia, trauma, exoftalmia, ruptura de bexiga e vasos hipertrofiados em relação ao RDC. Brown et al. (2009) realizaram descompressões rápidas em salmões reais juvenis, marcados com radiotransmissores, e encontraram sete tipos de injúrias. Essas injúrias são aquelas identificadas nas espécies quando estas passam através de turbinas hidrelétricas (Cramer e Oligher, 1964; Cada, ~1990, 2001; Brown e outros, 2009).

Não foi comparado à frequência de injúrias de barotrauma entre duas espécies (*A. cf. bimaculatus* e *P. vimboides*), mas sim a frequência de ocorrência nas duas espécies. Diferentemente de Kerr et al., (2023) que avaliaram duas espécies de peixes neotropicais (Pacu, *Piaractus mesopotamicus*, e piracanjuba, *Brycon orbignyanus*) e após descompressão rápida controlada, observaram diferenças interespecíficas consideráveis nas frequências de lesões de barotrauma e nas respostas exibidas. No presente estudo

observou a respostas a descompressão induzida em *A. cf. bimaculatus* e *P. vimboides*, compreendendo que cada uma das espécies tem uma resposta os diferentes perfis de pressão.

A RDC é frequentemente observada como um dos principais preditores de barotrauma em peixes (Brown *et al.* 2012a; 2012b; 2014; Silva *et al.* 2018). Marques (2017) observou que a razão de descompressão foi a principal variável a influenciar a ocorrência de lesões, principalmente para hemorragia e embolias que apresentaram frequência de ocorrência superior a 75%. De acordo com as análises do presente estudo a RDC não foi a preditora da ocorrência de lesões, o que pode ser indicativo da susceptibilidade das espécies estudadas.

Em *A. cf. bimaculatus* e *P. vimboides* não foram observadas diferenças na incidência de ruptura da bexiga natatória. A ruptura da bexiga ficou entre 50% e 76% dos indivíduos, *A. cf. bimaculatus* e para *P. vimboides* foi superior a 80% dos indivíduos. As duas espécies possuem bexiga natatória de câmara dupla semelhante as estudadas por Kerr *et al.* (2023), porém no estudo citado foram observadas diferenças na incidência de ruptura da bexiga entre as duas espécies (*Piaractus mesopotamicus* e *Brycon orbignyanus*).

Em comparação, lesões foram observadas com pouca frequência em salmão Chinook juvenil fisóstomo exposto a um RPC de 2,12 ou menos (Brown *et al.* 2012b) e quatro espécies australianas tiveram uma probabilidade de 50% de permanecer livre de lesões abaixo de um RPC entre 2,45  $\geq$  (perca prateada) e 3,75 (bacalhau Murray) (Pflugrath *et al.* 2018).

Em relação a ocorrência frequente de vasos hipertrofiados em *A. cf. bimaculatus* em que foi superior a 81% dos indivíduos em todos as RDC (exceção no controle 6,6%), e para *P. vimboides* superior a 70% dos indivíduos na maioria dos RDC. À medida que os peixes são descomprimidos, o gás pode sair da solução no sangue e nos tecidos, levando à formação de bolhas no sangue e nos tecidos (êmbolos e enfisema) e ruptura da vasculatura ou hemorragia (Cramer e Oligher, 1964; Tsvetkov *et al.*, 1972; Beyer *et al.*, 1976; Rummer e Bennett, 2005; Brown e outros, 2009).

Na avaliação das diferentes taxas de descompressão em *A. cf. bimaculatus* 90% dos indivíduos apresentaram injúrias. A mais frequentes foram embolia, ruptura da bexiga, hemorragia e vasos hipertrofiados, quando comparadas as diferentes taxas de descompressão em *P. vimboides* não apresentaram diferenças significativas entre elas. Tal resultado sugere que as taxas não apresentavam um tempo de descompressão com

uma diferença substancial para que fossem percebidas alterações. As espécies analisadas nesse estudo são fisóstomas, possuem um duto pneumático que conecta o esôfago à bexiga natatória, eles podem liberar gás, alterando a probabilidade de lesões.

Brown *et al.*, (2012a) relatam que em menores razões de descompressão ou variações de pressão mais lentas, lesões como embolia e hemorragia ainda são frequentes e possivelmente explicáveis pela dissolução dos gases nos fluidos corporais, advinda da redução da pressão. E que descompressões mais rápidas não permitem tempo para o corpo do peixe se ajustar e expelir os gases em expansão, onde maiores diferenças de pressão, significam maior expansão dos gases (Brown *et al.*, 2009; Stephenson *et al.*, 2010), de acordo com a lei de Boyle (Brown *et al.*, 2012b).

Os peixes do presente estudo analisados após 120 horas, quanto a ocorrência de injúrias, apenas o grupo controle não apresentou injúrias. A frequência média de injúrias nos órgãos foram vasos hipertrofiados (65% dos indivíduos) e hemorragia nas vísceras (50% dos indivíduos). Estes resultados podem ser característicos de uma capacidade de recuperação ou sistema de recuperação. Já no estudo de Teixeira (2021) a ocorrência se deu em embolia nadadeira caudal, hemorragia na pele, hemorragia no olho e embolia na pele.

Na avaliação de sobrevivência, os indivíduos que foram submetidos as pressões de aclimação 255 kPa e 357 tiveram o número menor de sobreviventes ao processo de descompressão, sendo estes perfis de pressão os responsáveis pelo maior número mortes logo após a descompressão no referido experimento. Peixes aclimatados a maiores pressões sofrem traumas mais graves, devido a necessidade de carregar mais moléculas de gases na bexiga natatória para atingir flutuabilidade neutra (Trumbo *et al.*, 2014). Todos os indivíduos levados a observação por 120 horas sobreviveram, diferentemente do estudo de Teixeira (2021) em que o grupo com maior taxa de sobrevivência apresentou seis animais vivos, 60%, após 120 horas de observação.

A capacidade de recuperar as lesões, após um determinado tempo, decorrido da descompressão, pode ser explicado pelo fato de o organismo conseguir absorver êmbolos e pontos hemorrágicos, sendo observado por Magalhães (2009). Ele estudou exemplares de lambari por 96 horas após a descompressão e relatou que existe uma recuperação das lesões. Portanto, quando a lesão não é severa a ponto de comprometer a sobrevivência do animal, este possui capacidade de recuperar e absorver lesões (Pflugrath, 2018).

## 6. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que as espécies são susceptíveis as lesões e que elas podem não ser apenas em razão da descompressão, ou mesmo que elas precisam ser testadas observando outras variáveis que possam contribuir para que esse resultado.

Ainda há muito a ser estudado sobre os impactos que os empreendimentos hidrelétricos podem causar à ictiofauna, pois eles advêm de muitas variáveis e afetam muitas espécies. Assim como temos uma diversidade expressiva de espécies de peixes, bem como diferentes respostas para cada uma delas ao contato com as estruturas de usinas hidrelétricas. É preciso saber o quanto a descompressão rápida influencia ao barotrauma nos diferentes cenários encontrados no Brasil.

A análise de diferentes taxas de descompressão, demonstrou que não houve nenhuma diferença estatística entre as taxas trabalhadas, sendo assim será preciso promover testes com diferenças de taxas maiores e para mais espécies em busca de respostas sobre o quanto essa variável pode prever lesões do barotrauma.

Peixes estão susceptíveis as injúrias quando entram em contato com as turbinas ou vertedouros, mas o quanto são capazes de sobreviver as demais adversidades encontradas no ambiente e como eles respondem fisiologicamente as lesões são outros fatores que ainda precisamos saber mais. De acordo com esse estudo todos os indivíduos levados a observação por 120 horas sobreviveram.

Conhecer os limiares de pressão suportados por cada espécie permite criar soluções para reduzir os efeitos da variação de pressão em estruturas de usinas hidrelétricas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agostinho, A., Miranda, L., Bini, L., Gomes, L., Thomaz, S., and Suzuki, H. (1999). "Patterns of Colonization in Neotropical Reservoirs, and Prognoses on Aging," in *Theoretical Reservoir Ecology and its Applications*, eds. J. Tundisi and M. Straskraba (São Carlos: International Institute of Ecology), 227–267.

- Agostinho AA, Bini LM, Gomes LC, Júlio Júnior HF, Pavanelli CS, Agostinho CS (2004) Fish assemblages. In: Thomaz SM, Agostinho AA, Hahn NS (Eds) *The Upper Paraná River and its Floodplain: Physical Aspects, Ecology and Conservation*. Backhuys Publishers, Leiden, 223–246.
- Agostinho, A.A.; Gomes, L.C. & Pelicice, F.M. (2007). *Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatórios do Brasil*. Maringá: Eduem.
- Ambiente Brasil. (2004). Mortandade de Peixes Paralisa Usina de Funil em MG. Publicado em 30/01/2004, disponível em <http://noticias.ambientebrasil.com.br>.
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>.
- Andrade, F.; Prado, I.G.; Loures, R.C. & Godinho, A.L. (2012). Evaluation of techniques used to protect tailrace fishes during turbine maneuvers at três Marias dam, Brazil. *Neotropical Ichthyology*. Vol. 10 (4): 723-730.
- ANEEL, agência nacional de energia elétrica. 2021. No dia mundial da água, ANEEL publica infográfico sobre hidrelétricas no Brasil. Disponível em: <https://bit.ly/3cppeys>. Acesso em: 09 fev. 2022.
- Aquino, D. Avaliação histológica da bexiga natatória de peixes das ordens perciformes e characiformes: contribuição para o melhor entendimento dos efeitos da descompressão em peixes. Dissertação de pós-graduação em tecnologias para o desenvolvimento sustentável, Universidade Federal de São João Del Rei, campus Ouro Branco, 2016.
- Arcifa, MS & ALH Esguý'cero, 2012. A ictiofauna na passagem de peixes da represa de Ourinhos, rio Paranapanema. *Neotropical Ichthyology* 10: 715–722.
- Bakken, TH, H. Sundt, A. Ruud & A. Harby, 2012. Desenvolvimento de pequenas e grandes hidrelétricas na Noruega, comparação de impactos ambientais. *Energy Procedia* 20: 185–199.
- Barbieri, G., J. R. Verani & M. C. Barbieri, 1982. Dinâmica quantitativa da nutrição de *Hoplias malabaricus* (Bloch, 1794) (Pisces, Erythrinidae), na Represa do Lobo (Brotas-Itirapina/SP). *Revta bras. Biol.*, Rio de Janeiro
- Barletta, M., Jaureguizar, A. J., Baigun, C., Fontoura, N. F., Agostinho, A. A., AlmeidaVal, V. M. F., et al. (2010). Fish and aquatic habitat conservation in South America: A continental overview with emphasis on neotropical systems. *J. Fish Biol.* 76, 2118–2176. doi:10.1111/j.1095-8649.2010.02684.x
- Baumgartner, L.J.; Deng, Z.D.; Thorncraft, G.; Boys, C.A.; Brown, R.S.; Singhanouvong, D. & Phonekhampeng, O. (2014). Perspective: towards environmentally acceptable criteria for downstream fish passage through mini hydro and irrigation infrastructure in the lower Mekong river basin. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Vol. 6, 012301.
- Bailly D, Agostinho AA, Suzuki HI (2008) Influence of the flood regime on the reproduction of fish species with different reproductive strategies in the Cuiabá River, Upper Pantanal, Brazil. *River Research and Applications* 24(9): 1218–1229. <https://doi.org/10.1002/rra.1147>



- Beirão, B. Avaliação e desenvolvimento de métodos para estudos de barotrauma em peixes em turbinas de usinas hidrelétricas. Dissertação de Pós-Graduação em Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal de São João del Rei, 2015.
- Beirão, B.; Silva, L. & Walker, R. Determining barotrauma in the pictus catfish, *pimelodus pictus*, experimentally exposed to simulated hydropower turbine passage. *Marine and freshwater research*, 2018.
- Beyer, D. L.; D'Aoust, B. G. & Smith, L. S. Decompression-induced bubble formation in salmonids: comparison to gas bubble disease. *Undersea Biomedical Research*. 3, 321–338, 1976.
- Benejam, L., S. Saura-Mas, M. Bardina, C. Sola`, A. Munne´, E Garcý´a-Berthou & A. Munn, 2016. Impactos ecológicos de pequenas centrais hidrelétricas em peixes de riachos de cabeceira: dos efeitos individuais aos comunitários. *Ecology of Freshwater Fish* 25: 295–306
- Boys, C.A.; Navarro, A.; Robinson, W.; Fowler, T.; Chilcott, S.; Miller, B.; Pflugrath, B.; Baumgartner, L.J.; Mcpherson, J.; Brown, r. & Deng, z. (2014). Downstream fish passage criteria for hydropower and irrigation infrastructure in the murray-darling basin. Fisheries final report series. Nsw department of primary industries. No . 141. Issn 1837- 2112.
- Boys, C. A.; Robinson, W.; Miller, B.; Pflugrath, B.; Baumgartner, L. J.; Navarro, A.; Brown, R.; Deng, Z. D. A piecewise regression approach for determining biologically relevant hydraulic thresholds for the protection of fishes at river infrastructure. *Journal of fish biology*, v. 88, n. 5, p. 1677-1692, 2016.
- Boys, Craig A., et al. "Physical and hydraulic forces experienced by fish passing through three different low-head hydropower turbines." *Marine and Freshwater Research* 69.12 (2018): 1934-1944.
- Britski, H. A. 1964. Sobre uma nova espécie de *Astyanax* do Rio Mogi-Guassu (Pisces, Characidae). *Papéis Avulsos do Departamento de Zoologia, Secretaria da Agricultura*, 16 (21): 213-215
- Britski, H.A. (1972). Peixes de água doce do Estado de São Paulo: Sistemática. In: *Poluição e Piscicultura*. Faculdade de Saúde Pública da USP, Instituto de Pesca da C.P.R.N. da Secretaria da Agricultura, São Paulo, p.79-108
- Brown, R.S.; Carlson, T.J.; Welch, A.E.; Stephenson, J.R.; Abernethy, C.S.; Ebberts, B.D.; Langeslay, M.J.; Ahmann, M.L.; Feil, D.H.; Skalski, J.R. & Townsend, R.L. (2009). Assessment of Barotrauma from Rapid Decompression of Depth Acclimated Juvenile Chinook Salmon Bearing Radiotelemetry Transmitters. *Transactions of the American Fisheries Society*. Vol. 138, p. 1285-1301.
- Brown, R.S.; Pflugrath, B.D.; Carlson, T.J. & Deng, Z.D. (2012a). The effect of an externally attached neutrally buoyant transmitter on mortal injury during simulated hydroturbine passage. *Journal of renewable and sustainable energy*. 4, 013107.
- Brown, RS, Carlson, TJ, Gingerich, AJ, Stephenson, JR, Pflugrath, BD, Welch, AE, Langeslay, MJ, Ahmann, ML, Johnson, RL, Skalski, JR, Seaburg, AG, Townsend, RL, 2012b. Quantificando danos mortais em salmões Chinook juvenis expostos à passagem simulada de hidroturbina. *Trad. Sou. Peixe. Soc.* 141 (1), 147-157. <https://doi.org/10.1080/00028487.2011.650274>.

- Brown, Richard S. et al. Vulnerability of larval and juvenile white sturgeon to barotrauma: can they handle the pressure?. *Conservation Physiology*, v. 1, n. 1, p. cot019, 2013.
- Brown, R.S.; Colotelo, A.H.; Pflugrath, B.D.; Boys, C.A.; Baumgartner, L.J.; Deng, Z.D.; Silva, L.G.M.; Brauner, C.J.; Mallen Cooper, M.; Phonekhampeng, O.; Thorncraft, G. & Singhanouvong, D. (2014). Understanding barotrauma in fish passing hydro structures: a global strategy for sustainable development of water resources. *Fisheries*, vol. 39, n. 3, p. 108-122.
- Brown, R. S.; Walker, R. W.; Stephenson, J. R. A Preliminary Assessment of Barotrauma Injuries and Acclimation Studies for Three Fish Species. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US), 2015.
- Brown, E., Samer Sulaeman, Raul Quispe-Abad, Norbert Müller, Emilio Moran, Safe passage for fish: The case for in-stream turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 173, 2023.
- Buckup, P. A., N. A. Menezes & M. S. Ghazzi. 2007. *Catálogo das espécies de peixes de água doce do Brasil*. Museu Nacional. 195p.
- Čada, G. F.; Coutant, C. C.; Whitney, R. R. Development of Biological Criteria for the Design of Advanced Hydropower Turbines. Idaho Falls, ID: U.S. Department of Energy Report, v. 97, 1997.
- Čada G.F. (2001). The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries*. Vol. 26, n. 9, p. 14-23.
- Carvalho PA, Paschoalini AL, Santos GB, Rizzo E, Bazzoli N (2009) Reproductive biology of *Astyanax fasciatus* (Pisces: Characiformes) in a reservoir in southeastern Brazil. *Journal Application Ichthyology* 25: 306-313.
- Castagnolli, Newton. Criação de peixes de água doce. Jaboticabal, SP: FUNEP, 1992. 189p.
- Castro, RMC & Vari, RP (2004). Detritívoros da família de peixes sul-americanos Prochilodontidae (Teleostei: Ostariophysi: Characiformes): um estudo filogenético e revisional. *Contribuição do Smithsonian. Zoológico*. 622, 1-89
- Colotelo, A.H.; Pflugrath, B.D.; Brown, R.S.; Brauner, C.J.; Mueller, R.P.; Carlson, T.J.; Deng, Z.D.; Ahmann, M.L. & Trumbo, B.A. (2012). The effect of rapid and sustained decompression on barotrauma in juvenile brook lamprey and Pacific lamprey: Implications for passage at hydroelectric facilities. *Fisheries Research*. 129-130: 17-20.
- Flecker AS. Ecosystem engineering by a dominant detritivore in a diverse tropical stream. *Ecology*. 1996; 77(6):1845-5
- Fricke, R., W. N. Eschmeyer, and J. D. Fong. "Species by Family." Subfamily.[online] URL:< <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/SpeciesByFamily.asp> (2018).
- Fu, T., Deng, Z.D., Duncan, J.P., Zhou, D., Carlson, T.J., Johnson, G.E., Hou, H., 2016. Assessing hydraulic conditions through Francis turbines using an autonomous sensor device. *Renewable Energy* 99, 1244–1252.
- Graça WJ, Pavanelli CS (2007) Peixes da Planície de Inundação do Alto Rio Paraná e Áreas Adjacentes. Eduem, Maringá, 241 pp

- Hayes, DB, Dodd, H. e Lessard, J. (2008). Efeitos de pequenas barragens nas comunidades de peixes de riachos de água fria. Simpósio da Sociedade Americana de Pesca, 49, 1791–1806
- Helfman, G. S., Collette, B. B., Facey, D. E., & Bowen, B. W. (2009). *The diversity of fishes: biology, evolution, and ecology*. John Wiley & Sons.
- IEF – Instituto Estadual de Florestas. (2007). CEMIG será multada por mortandade de peixes. Publicado em 04/04/2007. Disponível em <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/1/241-cemig-sera-multada-por-mortandade-de-peixes>.
- Katopodis, C. Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 43, no 5, 2005. p. 451-467.
- Kerr, J. R., Castro, A. L. F., Melo, N. O., Daniels, J. A., Holgate, A., Dolman, L. A., ... & Kemp, P. S. (2023). The effects of simulated hydropower turbine rapid decompression on two neotropical fish species. *Science of the Total Environment*, 903, 166770.
- Loures, R.C. & Pompeu, P.S. (2012). Temporal variation in fish community in the tailrace at Três Marias Hydroelectric Dam, São Francisco River, Brazil. *Neotropical Ichthyology*. Vol. 10 (4): 731-740.
- Magalhães, V.P.F. (2009). Metodologia para Avaliação dos Efeitos de Pressão e Turbulência em Peixes. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Marques, BS 2017. Avaliação dos efeitos macroscópicas da exposição simulada a descompressão rápida em juvenis da espécie *Astyanax lacustris* (Lütken, 1875). Dissertação de Mestrado, PPGTDS, UFSJ, Ouro Branco, Brasil, 84p.
- Nelson, Joseph S.; GRANDE, Terry C.; WILSON, Mark VH. *Fishes of the World*. John Wiley & Sons, 2016.
- Oyakawa, O.T.; Akama, A.; Mautari, K.C.; Nolasco, J.C. 2006. Peixes de riachos da Mata Atlântica nas Unidades de Conservação do vale do rio Ribeira de Iguape no Estado de São Paulo. São Paulo: Editora Neotropical. 201p.
- Pelicice et al., 2017 PELICICE, Fernando M. et al. Neotropical freshwater fishes imperilled by unsustainable policies. *Fish and fisheries*, v. 18, n. 6, p. 1119-1133, 2017.
- Pereira Filho H.P. 2000. Biologia reprodutiva de fêmeas de lambari prata (*Astyanax scabripinnis* Jenyns, 1842), em condições de cativeiro. Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Brasil. 94 p.
- Pérez, A.G. (2015). Deslocamentos e mortalidade de peixes nos rios Grande e Paranaíba, MG. Tese de Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Pflugrath et al., 2018 PFLUGRATH, Brett D.; BOYS, Craig A.; CATHERS, Bruce. Predicting hydraulic structure-induced barotrauma in Australian fish species. *Marine and Freshwater Research*, v. 69, n. 12, p. 1954-1961, 2018.

- Pflugrath et al., 2020 PFLUGRATH, Brett D. et al. The susceptibility of Juvenile American shad to rapid decompression and fluid shear exposure associated with simulated hydroturbine passage. *Water*, v. 12, n. 2, p. 586, 2020.
- Pinto, M.D.S., Doria, C.R.C., Marques, E.E., 2019. Alterações temporais sobre a estrutura funcional das assembleias de peixes durante onze anos de formação de um reservatório do médio rio Tocantins. *Brasil. Biot. Amaz.* 9, 17–21. <https://doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v9n1p17-21>.
- Polaz CNM, Bataus YSL, Desbiez A, Reis ML. 2011. Plano de ação nacional para a conservação das espécies aquáticas ameaçadas de extinção da bacia do rio Paraíba do Sul. *Série Espécies Ameaçadas*.
- Porto-Foresti, F.; Hashimoto, D.T.; Senhorini, J.A.; Foresti, F. Hibridação em piscicultura: monitoramento e perspectivas. In: BALDISSEROTTO, B.; GOMES, L.C. (Org). *Espécies nativas para piscicultura no Brasil*. 2 ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, v.1, p. 589-601, 2010
- Prado PS, Souza CC, Bazzoli N, Rizzo E (2011) Reproductive disruption in lambari *Astyanax fasciatus* from a Southeastern Brazilian reservoir. *Ecotoxicol Environ Saf* 74:1879–1887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.07.017>
- Proença, Carlos Eduardo Martins de & BITTENCOURT, Paulo Roberto Leal. *Manual de piscicultura tropical*. Brasília, DF: IBAMA, 1994. 196p., Ilustrado.
- Ríos-Touma, B., Ramirez, A., 2019. Múltiplos estressores na região neotropical: Impactos ambientais em hotspots de biodiversidade. Capítulo 12. In: Sabater, S., Elozegi, A., Ludwig, R. (Eds.), *Múltiplos Estressores em Ecossistemas Fluviais: Status, Impactos e Perspectivas para o Futuro*. Elsevier, pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811713-2.00012-1> \_ pág.392.
- Rummer, J. L., & Bennett, W. A. Physiological effects of swim bladder overexpansion and catastrophic decompression on Red Snapper. *Transactions of the American Fisheries Society*. v. 134, p. 1457-1470, 2005
- Sales, NG, Mariani, S., Salvador, GN, Pessali, TC, Carvalho, DC, 2018. A diversidade oculta dificulta os esforços de conservação em um sistema fluvial neotropical altamente impactado. *Frente. Geneta*. 9, 271. <https://doi.org/10.3389/FGENE.2018.00271>.
- Sato, Y., & Godinho, H. P. (2003). Migratory fishes of the São Francisco River. In J. Carolsfeld, B. Harvey, C. Ross, & A. Baer (Eds.), *Migratory fishes of South America. Biology, fisheries and conservation status* (pp.195–232). Victoria, BC: World Fisheries Trust.
- Silva, D.; Pessoa, E.; Costa, S.; Chellappa, N. & Chellappa, S. Ecologia alimentar de *astyanax lacustris* (osteichthyes: characidae) na lagoa do Piató, assu, Rio Grande do Norte, Brasil. *Biota amazônica, Macapá*, v. 2, n. 1, p. 74-82, 2012.
- Silva, C. Pequenas centrais hidrelétricas no rio Sapucaí-Mirim (sp): diversidade e estrutura genética de *astyanax lacustris*. Tese (mestrado em ciências biológicas) – instituto de biociências, Campus de Botucatu, Unesp. Botucatu, p. 64. 2020.
- Silva, L.G.M. (2010). Estudos de sistemas para repulsão de peixes como alternativas de mitigação de impacto ambiental em usinas hidrelétricas e canais para abastecimento de

- água. Tese de doutorado em engenharia mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Silva, L.; Beirão, B.; Falcão, R.; Castro, A. & Dias, E. It's a catfish! Novel approaches are needed to study the effects of rapid decompression on benthic species. *Marine and Freshwater Research*, 2018.
- Silva, L.; Castro, A. & Kemp, P. Mortandade de Peixes em Hidrelétricas: identificando problemas e cocriando soluções. 2021.
- Soares, N. S. F. Análise Experimental dos Efeitos da Descompressão Rápida em Peixes da Ordem Perciformes. Dissertação (Mestrado em tecnologias para o desenvolvimento sustentável), Universidade Federal de São João Del-Rei/Campus alto Paraopeba, Ouro Branco, Minas Gerais, 2016.
- Stanley, E. H., Luebke, M. A., Doyle, M. W., & Marshall, D. W. (2002). Short-term changes in channel form and macroinvertebrate communities following low-head dam removal. *Journal of the North American Benthological Society*, 21, 172–187. <https://doi.org/10.2307/1468307>
- Stephenson, J.R.; Gingerich, A.J.; Brown, R.S.; Pflugrath, B.D.; Deng, Z.; Carlson, T.J.; Langeslay, M.J.; Ahmann, M.L.; Johnson, R.L. & Seaburg, A.G. (2010). Assessing barotrauma in neutrally and negatively buoyant juvenile salmonids exposed to simulated hydro-turbine passage using a mobile aquatic barotrauma laboratory. *Fisheries Research*. Vol. 106.
- Stockler, N. Análise experimental dos efeitos da descompressão rápida em peixes da ordem perciformes. Dissertação de pós-graduação em tecnologias para o desenvolvimento sustentável, Universidade Federal de São João Del Rei, 2016.
- Teixeira, H. A. Barotrauma: uma avaliação dos danos e sobrevivência após descompressão induzida em peixes da espécie *Astyanax lacustris* (LÜKTEN, 1875). Trabalho de Conclusão de Estágio Supervisionado Bacharel em Ciências Biológicas. Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Dom Bosco, São João Del Rei, 2021
- Toms, J. D. & Lesperance, M. L. Piecewise regression: a tool for identifying ecological thresholds. *Ecology* 84, 2034–2041. 2003.
- Toussaint A, Charpin N, Brosse S, Villéger S (2016) Global functional diversity of freshwater fish is concentrated in the Neotropics while functional vulnerability is widespread. *Sci Rep* 6:22125
- Trumbo, B.A.; Ahmann, M.L.; Renholds, J.F.; Brown, R.S.; Colotelo, A.H. & Deng, Z.D. (2014). Improving hydroturbine pressures to enhance salmon passage survival and recovery. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 24: 955- 965.
- Vazzoler, A. E. A. M., & Menezes, N. A. (1992). Síntese de conhecimentos sobre o comportamento reprodutivo dos Characiformes da América do Sul (Teleostei, Ostariophysi). *Revista Brasileira de Biologia*, 52(2), 627–640.
- Weber AA, Arantes FB, Sato Y, Rizzo E, Bazzoli N (2012) Oocyte adhesiveness and embryonic development of *Astyanax bimaculatus* (Linnaeus, 1758) (Pisces: Characidae). *Zygote* 21: 198-202.
- Wu, NC, Jiang, WX, Fu, XC, Zhou, SC, Li, FQ, Cai, QH e Fohrer, N. (2010). Impactos temporais de uma pequena central hidrelétrica na comunidade de algas bentônicas.

*Limnologia Fundamental e Aplicada*, 177, 257–266. <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2010/0177-0257>

Zarfl, C., Lumsdon, AE, Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (2014). Um boom global na construção de barragens hidrelétricas. *Ciências Aquáticas*, 77, 161–170. <https://doi.org/10.1007/s00027-014-0377-0>

Zeleňáková, Martina et al. Environmental impact of small hydro power plant—a case study. *Environments*, v. 5, n. 1, p. 12, 2018. (Arcifa & Esguý'cero, 2012;