

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS PESQUEIROS E
ENGENHARIA DE PESCA

JOSIAS BATISTA NEVES

DETERMINAÇÃO DA ELETROSENSIBILIDADE DE PEIXES COMO
MEDIDA DE MANEJO EM RESERVATÓRIOS HIDROELÉTRICOS
NEOTROPICAIS

Toledo
2025

JOSIAS BATISTA NEVES

**DETERMINAÇÃO DA ELETROSENSIBILIDADE DE PEIXES COMO
MEDIDA DE MANEJO EM RESERVATÓRIOS HIDROELÉTRICOS
NEOTROPICAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca – Nível de Mestrado e Doutorado, do Centro de Engenharias e Ciências Exatas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

Área de concentração: Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

Orientador: Prof. Dr. Éder André Gubiani
Coorientador: Prof. Dr. Dirceu Baumgartner

Toledo
2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Batista Neves, Josias

DETERMINAÇÃO DA ELETROSENSIBILIDADE DE PEIXES COMO MEDIDA DE MANEJO EM RESERVATÓRIOS HIDROELÉTRICOS NEOTROPICAIS / Josias Batista Neves; orientador ÉDER ANDRÉ GUBIANI; coorientador DIRCEU BAUMGARTNER. -- Toledo, 2025.

61 p.

Tese (Doutorado Campus de Toledo) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, 2025.

1. ELETROSENSIBILIDADE EM PEIXES. 2. RESPOSTAS COMPORTAMENTAIS DE PEIXES EM BARREIRA ELÉTRICA ESTÁTICA. 3. MEDIDA DE MANEJO PARA PEIXES NEOTROPICAIS MIGRADORES EM ÁREAS DE RISCO DE PLANTAS HIDRELÉTRICAS. I. ANDRÉ GUBIANI, ÉDER , orient. II. BAUMGARTNER, DIRCEU , coorient. III. Título.

JOSIAS BATISTA NEVES

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela sua bondade e misericórdia, me agraciando com o dom da vida, concedendo a oportunidade de continuar no caminho da ciência e da pesquisa.

Aos meus pais Jerson de Paula Neves (*in memoriam*) e a minha mãe Jael Batista da Silva Neves, que sempre investiram e encorajaram a educação dos filhos.

Agradecimento em especial, à minha esposa Alini C. Pedrini Neves, por todo o seu companheirismo, apoio e cuidado. Desde a escola até o presente momento. Minha fonte de inspiração e amor!

Aos meus irmãos Josué e Cláudio, que sempre supriram minhas ausências na Soft.

Ao meu orientador Éder André Gubiani, professor muito querido e competente, que investiu em mim, mesmo frente às adversidades.

Aos professores Dirceu e Gilmar Baumgartner, que me coorientaram e também cooperaram em diversas fazes da minha carreira.

A todo o corpo docente do Programa de pós-graduação em mestrado e doutorado em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca-PREP, que não mediram esforços para compartilhar conhecimento e experiências.

Ao Grupo de Pesquisa em Recursos Pesqueiros e Limnologia – GERPEL, pelo empréstimo de laboratórios, estruturas e demais auxílios da pesquisa, bem como amizade dos componentes do grupo desde a graduação.

Aos amigos do Doutorado que contribuíram para a realização da fase experimental do trabalho em laboratório. Além do amigo Matheus Araujo e de Claudio L.B. Neves, meu irmão, que treinaram e operaram os experimentos.

DETERMINAÇÃO DA ELETROSENSIBILIDADE DE PEIXES COMO MEDIDA DE MANEJO EM RESERVATÓRIOS HIDROELÉTRICOS NEOTROPICAIS

RESUMO GERAL

Este estudo foi conduzido com o intuito de determinar os limiares de eletrosensibilidade de juvenis e adultos de peixes migradores neotropicais, composto por dois ensaios experimentais. Inicialmente, foram determinados os limiares de eletrosensibilidade em juvenis de curimba (*Prochilodus lineatus*), pacu (*Piaractus mesopotamicus*) e piapara (*Megaleporinus obtusidens*). *P. lineatus* apresentou maior tolerância aos campos elétricos, suportando tensões superiores em todos os limiares de eletrosensibilidade e tempos de recuperação mais rápidos. Por outro lado, *M. obtusidens* se destacou por ser mais influenciada pelas tensões elétricas, resultando em respostas de eletrosensibilidade mais rápidas e tempo de recuperação prolongado. O segundo ensaio, foi conduzido em indivíduos adultos e juvenis de *P. lineatus*, espécie que apresentou maior tolerância na primeira fase do experimento. Para isso, foram utilizados 10 peixes juvenis com comprimento médio padrão de 4,4 centímetros e 28 peixes adultos com média de 26,6 centímetros. As análises mostraram diferenças relevantes entre os grupos, evidenciando que os adultos apresentaram maior sensibilidade aos campos elétricos quando comparados aos juvenis. Ademais, os tempos de recuperação acentuaram ainda mais essa variação na resposta dos peixes aos campos elétricos, indicando que a influência da corrente elétrica é significativamente mais forte nos indivíduos maiores. Nesse sentido, adultos de *P. lineatus* apresentaram uma reação inicial ao efeito do campo elétrico antes das reações dos juvenis, com diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) tanto nas eletrosensibilidades quanto nos tempos de resposta. Isso sugere que o tamanho dos peixes exerce uma influência considerável nas suas reações aos campos elétricos, e que os indivíduos mais jovens e menores são menos afetados pelos campos elétricos do que os maiores e mais velhos, tanto em intensidade de tensão elétrica como em velocidade de reação. Sendo assim, uma barreira de dissuasão elétrica ajustada para os limiares de eletrosensibilidade dos juvenis de *P. lineatus* seria eficaz em repelir tanto *P. mesopotamicus* e *M. obtusidens* juvenis, como também os adultos de *P. lineatus*, já que a barreira estaria definida sob os maiores limiares estabelecidos.

Palavras-chave: Obstáculo comportamental, barreira comportamental, barreira elétrica.

DETERMINATION OF FISH ELECTROSENSITIVITY AS A MANAGEMENT MEASURE IN NEOTROPICAL HYDROELECTRIC RESERVOIRS

GENERAL SUMMARY

This study was conducted to determine the electrosensitivity thresholds of juvenile and adult Neotropical migratory fish, consisting of two experimental trials. Initially, the electrosensitivity thresholds were determined in juvenile curimba (*Prochilodus lineatus*), pacu (*Piaractus mesopotamicus*) and piapara (*Megaleporinus obtusidens*). *P. lineatus* showed greater tolerance to electric fields, withstanding higher voltages at all electrosensitivity thresholds and faster recovery times. On the other hand, *M. obtusidens* stood out for being more influenced by electric voltages, resulting in faster electrosensitivity responses and longer recovery times. The second assay was conducted on adult and juvenile *P. lineatus* individuals, the species that showed greater tolerance in the first phase of the experiment. Ten juvenile fish with an average standard length of 4.4 centimeters and 28 adult fish with an average of 26.6 centimeters were used. The analyses revealed significant differences between the groups, evidencing that adults were more sensitive to electric fields than juveniles. Furthermore, recovery times further accentuated this variation in the fish's response to electric fields, indicating that the influence of electric current is significantly stronger in larger individuals. In this sense, adult *P. lineatus* showed an initial reaction to the effect of the electric field before the reactions of juveniles, with statistically significant differences ($p < 0.05$) in both electrosensitivity and response times. This suggests that fish size exerts a considerable influence on their reactions to electric fields, and that younger and smaller individuals are less affected by electric fields than larger and older ones, both in terms of voltage intensity and reaction speed. Therefore, an electric deterrent barrier adjusted to the electrosensitivity thresholds of juvenile *P. lineatus* would be effective in repelling both *P. mesopotamicus* and *M. obtusidens* juveniles, as well as adults of *P. lineatus*, since the barrier would be defined under the highest established thresholds.

Keywords: Behavioral obstacle, behavioral barrier, electrical barrier.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	09
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
 <i>Capítulo I. Estimativas da eletrosensibilidade como medida para repulsão de peixes em tubos de sucção de usinas hidrelétricas.....</i>	
INTRODUÇÃO.....	21
MATERIAL E MÉTODOS.....	24
Delineamento experimental.....	24
Canal de testes e disposição dos eletrodos condutores.....	24
Distribuição e mapeamento das linhas de campo elétrico.....	25
Escolha das espécies.....	26
Manejo dos peixes em laboratório.....	27
Metodologia aplicada aos ensaios.....	28
Corrente elétrica e frequência aplicada aos peixes.....	29
Eletrosensibilidade e tempo de resiliência.....	29
Análise dos dados.....	30
RESULTADOS.....	30
Distribuição e mapeamento das linhas de tensão elétrica.....	31
Campo elétrico alternado (AC) onda senoidal e frequência elétrica de 60 Hz.....	31
Limiares de eletrosensibilidade.....	32
Tempo de resiliência (recuperação).....	32
DISCUSSÃO.....	34
Distribuição e mapeamento das linhas de tensão elétrica.....	34
Campo elétrico alternado (CA/AC) onda senoidal e frequência elétrica de 60 Hz.....	35
Limiares de eletrosensibilidade.....	36
Tempo de resiliência (recuperação).....	37
CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
MATERIAL SUPLEMENTAR S1. Parecer do comitê de ética.....	45
 <i>Capítulo II. Efeito do tamanho dos indivíduos sobre limiares de eletrosensibilidade em peixes.....</i>	
INTRODUÇÃO.....	50

MATERIAL E MÉTODOS	51
Delineamento experimental	51
Características da espécie alvo.....	52
Manejo dos peixes durante o experimento.....	53
Metodologia aplicada aos ensaios.....	53
Tempo dos limiares de eletrosensibilidade.....	53
Análise dos dados.....	53
RESULTADOS.....	54
DISCUSSÃO.....	56
CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
MATERIAL SUPLEMENTAR S1. Parecer do comitê de ética para os testes de eletrosensibilidade em adultos de curimba.....	60
MATERIAL SUPLEMENTAR S2. Parecer do comitê de ética para os testes de eletrosensibilidade em alevinos de curimba.....	61

1 INTRODUÇÃO GERAL

A necessidade dos peixes reofílicos migrarem livremente e com segurança é um requisito fundamental para a existência de suas populações (Parasiewicz *et al.* 2016). Desse modo, a conectividade fluvial tem papel fundamental para a manutenção dos movimentos migratórios (Jungwirth, 1998). Contudo, em ambientes aquáticos de água doce, a construção de barragens tem promovido a fragmentação das populações de peixes, especialmente daqueles de grande porte e migradores (Machut *et al.*, 2007; Wisniewolski & Engel, 2006; Agostinho *et al.*, 2016; Pelicice *et al.*, 2017). Com a construção das barragens ocorre a interferência nas rotas de migração dos peixes, levando ao isolamento destes tanto a montante quanto a jusante da barragem, consequentemente, atrapalhando sua forma de reprodução (Agostinho *et al.*, 1992). Essa interrupção da rota de migração reprodutiva das espécies pode levar a um declínio acentuado de peixes de uma população e até mesmo à extinção de algumas espécies (Larinier, 2001; Agostinho *et al.*, 2016).

Na região neotropical, o fenômeno mais comum de migração dos peixes é a piracema, que se caracteriza pela migração ascendente no rio na busca por um sítio reprodutivo. Segundo Pavlov (1989), esse comportamento dos peixes se movimentarem ou se orientarem contra o escoamento são denominados, respectivamente, de reotaxia e reofilia. Desse modo, os peixes que possuem esse comportamento são os organismos mais impactados pelos barramentos, pois, ao desempenhar a reotaxia, poderão se deparar com algumas ameaças a sua sobrevivência ao encontrarem um aproveitamento hidrelétrico em seu caminho (Junho, 2008). Esse movimento ascendente, acaba acarretando o acúmulo de peixes no sopé das barragens, vindo a desencadear outros impactos, tais como a mortandade em turbinas hidráulicas e vertedouros (Agostinho *et al.*, 1993). Isso ocorre quando os peixes são atraídos pelo escoamento contínuo de água provenientes das turbinas, o que faz com que os indivíduos se concentrem no interior dos tubos de sucção, onde eventualmente, poderá ocorrer a mortalidade de peixes em operações de manutenção das máquinas, com o esvaziamento do tubo de sucção e de reversão do modo de operação das máquinas de síncrono para geração elétrica (CEA, 2001). Esses exemplares podem ainda avançar no tubo de sucção tendo acesso aos componentes da turbina, onde ficam aprisionados em locais apertados quando, rapidamente, ocorre a redução das concentrações de oxigênio, variações súbitas na pressão, choque e compressão contra as pás, desorientação devido à alta turbulência no tubo de sucção e consequente susceptibilidade a predadores (Agostinho *et al.*, 1992; Cada, 2001).

Existem várias estratégias conhecidas para prevenir a presença de peixes nas zonas de risco em usinas hidrelétricas, e muitas delas já estão sendo adotadas. No entanto, frequentemente são indicadas apenas algumas práticas para a sua implementação, e não existem protocolos estabelecidos especificamente para as condições dos rios neotropicais. Como afirmam Therrien e Bourgeois (2000), essas estratégias podem ser organizadas em quatro categorias distintas: desvios ou derivação, barreiras físicas ou estruturais, barreiras comportamentais e sistemas de captura e transposição. Entre essas opções, destaca-se a utilização de barreiras comportamentais, que se mostra bastante eficaz ao modificar o comportamento de certas espécies, fazendo com que evitem áreas de risco (Noatch e Suski, 2012). Assim, nesse contexto, os peixes são repelidos e redirecionados, evitando a entrada no canal de fuga das usinas e a proximidade com o sistema de sucção.

As barreiras comportamentais não oferecem resistência a passagem da água, com isso não alteram a eficiência do sistema hidro energético, não restringem o fluxo da água ou o deslocamento de barcos recreativos e comerciais, não acumulam detritos ou tem a necessidade de manutenções regulares, contrariamente ao que ocorre com as barreiras estruturais, que visam impedir fisicamente o movimento dos peixes, com barras verticais ou horizontais, telas, redes de barreira e barragens baixas (Taft *et al.*, 2001). Desse modo, as barreiras comportamentais tornam-se uma alternativa promissora para manipular o movimento dos peixes através de estímulos comportamentais e desviá-los de regiões indesejadas direcionando-os para rotas de passagem preferidas (Adams *et al.*, 2001; Noatch e Suski, 2012; Weber *et al.*, 2016).

Para alcançarem seus objetivos, as barreiras comportamentais utilizam-se da aguçada e ampla sensibilidade dos peixes e as diferentes respostas a estímulos diversos que ocorrem no meio aquático, o que interfere principalmente em sua comunicação e orientação. Esses sistemas de dissuasão podem auxiliar no gerenciamento de estoques de peixes valiosos, guiando os peixes para longe de fontes de mortalidade, como as câmaras de turbinas hidrelétricas (Adams *et al.*, 2001). A escolha da tecnologia utilizada dependerá de fatores como espécies alvo, condições de instalação e condições do local. A utilização de luzes estroboscópicas, cortina de bolhas, ondas sonoras, barreiras de velocidade, hipóxia, hipercapnia, compostos químicos e barreiras elétricas, são alternativas de barreiras comportamentais de dissuasão de peixes.

Dentre as alternativas, uma bastante promissora é a utilização de campos elétricos através do uso de barreiras elétricas. Essas barreiras, se utilizam de uma resposta comportamental dos peixes à aplicação de campos elétricos, chamada de eletrosensibilidade. Isso se deve a capacidade desses organismos serem sensíveis às correntes elétricas que são aplicadas na água em consequência do teor salino de seus fluidos corpóreos, o que os torna bons

condutores de eletricidade, facilitando a propagação do campo elétrico no meio aquático e causando interferência no comportamento natural dos peixes (Katopodis *et al.*, 1994). Dessa forma, as barreiras elétricas tornaram-se um importante instrumento de dissuasão de peixes em canal de fuga de usinas hidrelétricas e demais áreas de risco (Königson *et al.*, 2002).

A atuação dos campos elétricos sobre os peixes pode atrair, repelir, paralisar e até mesmo levar a morte, dependendo das tensões às quais estão sujeitos (Halsband & Halsband, 1984; Reynolds, 1996). Os efeitos dos campos elétricos variam conforme as espécies, tamanho e volume dos peixes, sendo que, quanto maiores forem os indivíduos, estes estarão sujeitos à maior diferença de potencial. Além desses fatores, também interferem nas respostas dos peixes a condutividade da água, projeto e colocação de eletrodos, tipo e direção da corrente elétrica, sendo que esta pode ser proveniente de corrente pulsada (PDC), contínua (DC/CC) ou alternada (AC/CA) (Copp, 1989; Bohlin *et al.*, 1989, Cowx e Lamarque, 1990; Hill e Willis, 1994; Dolan e Miranda, 2003).

Em intensidades adequadas, os campos elétricos têm a capacidade de serem dissuasores eficazes para peixes (Katopodis *et al.*, 1994). É possível sensibilizá-los utilizando qualquer tipo de corrente elétrica, no entanto, para se obter maior eficiência dependendo do objetivo desejado, deve-se optar pela utilização de uma ou outra solução. Desse modo, Lopes (2009) e Silva (2010), recomendaram a utilização de campos elétricos AC, de ondas senoidais a frequência de 60 Hz, pois resultaram em limiares inferiores de tensão nos peixes, quando comparados a outras formas de ondas e frequências. A escolha de corrente alternada para a energização das barreiras elétricas se dá, pois, esse tipo de campo elétrico não atrai o peixe como faz a corrente contínua, e ainda é o tipo de tensão gerada pelas usinas hidrelétricas. Combinando a eficiência desse método com a sua praticidade de execução, a corrente alternada se torna uma estratégia importante para testes de eletrosensibilidade em peixes da região neotropical.

A utilização da corrente elétrica como fonte de dissuasão de peixes tem uma longa história na gestão dos recursos pesqueiros, ganhando recentemente mais interesse, devido ao aumento do número de espécies invasoras (ACRCC, 2017; DFO, 2017), e do acentuado crescimento das operações hidrelétricas em rios de todo o mundo, causando diversos riscos às comunidades de peixes nativas. Pesquisas e aplicações de campos elétricos em peixes tem se concentrado, na última década, em ações para restringir o deslocamento de espécies não nativas invasoras, como carpas asiáticas (Holliman, 2011; Holliman *et al.*, 2015), lampreias marinhas adultas (Johnson *et al.*, 2014; Johnson *et al.*, 2016), o Walleye (Weber *et al.*, 2016), a carpa comum (Kim & Mandrak, 2017; Bajer *et al.*, 2018) e a truta arco-íris (Kim & Mandrak, 2019);

bem como na proteção de estoques de peixes importantes em tomadas de usinas hidrelétricas e estações de bombeamento de água, como carpas (Yalçinkaya *et al.*, 2017), o esturjão do lago (Stoot *et al.*, 2018), peixes diversos (Egg *et al.*, 2019) e a enguia europeia (Miller *et al.*, 2021).

A maioria desses estudos abordou a utilização de campos elétricos e barreiras elétricas em algumas poucas espécies de peixes presentes nos rios e nos Grandes Lagos Laurencianos, localizados no hemisfério norte, especialmente nos Estados Unidos e Canadá. Essas áreas foram pioneiras na aplicação dessa técnica de dissuasão de peixes, iniciada há quase 100 anos por Baker (1928), e posteriormente retomada na década de 1950 por Applegate *et al.* (1952), que empregaram corrente alternada (AC) para bloquear e direcionar a lampreia marinha invasora *Petromyzon marinus*. Apesar da longa trajetória de sucesso no uso de barreiras elétricas como uma ferramenta para manipulação do comportamento dos peixes, há uma escassez de registros de estudos e aplicações desse método como estratégia de manejo e atenuação dos impactos da atividade hidrelétrica sobre espécies de peixes em outras regiões do planeta. Isso é especialmente relevante em áreas que possuem uma maior diversidade de espécies e onde se exige um número significativo de pesquisas sobre estratégias de prevenção.

Dados sobre a eficácia das barreiras elétricas, configurações de campo, espécies-alvo, tamanho dos peixes e seu comportamento ainda são escassos para muitas espécies e, em alguns casos, inexistentes (Reynolds, 1996; Noatch e Suski, 2012; Johnson *et al.*, 2014; Parker *et al.*, 2015; Johnson *et al.*, 2016; ACRC, 2017; DFO, 2017). Na região Neotropical, a área com a maior diversidade de peixes de água doce no planeta, existem 4.235 espécies descritas (Tonella *et al.* 2023) e estimativas apontam para cerca de 9.000 espécies (Reis *et al.*, 2016), o que representa aproximadamente 28% do total de espécies de peixes conhecidas, com uma ampla parte dessas espécies oriundas das bacias do Amazonas e do Paraná (Nelson *et al.*, 2016). No que se refere ao estudo de barreiras elétricas, a situação é semelhante, já que os peixes reofílicos neotropicais são os mais afetados pelas atividades de empreendimentos hidrelétricos, e praticamente não há avaliações sobre a contenção desses peixes com a aplicação de campos elétricos. Portanto, o estudo da eletrosensibilidade e das barreiras elétricas são uma importante iniciativa para a implantação de uma ferramenta de manejo visando limitar e modificar o comportamento dessas espécies de peixes dentro das barragens neotropicais, especialmente às brasileiras.

Á vista disso, a configuração e implantação de barreira elétrica está diretamente relacionada com a sua atuação e eficácia sobre as espécies de peixes que se tem como alvo (Dolan e Miranda, 2003). Além do mais, para que a operação das barreiras elétricas sobre os peixes seja eficiente, é necessário que os limites de eletrosensibilidade dos indivíduos sejam

conhecidos previamente, no intuito de que o campo elétrico aplicado nunca ultrapasse os limiares de risco determinados para as espécies. Se ultrapassados, os peixes podem ficar atordoados, se tornando presas fáceis ou até mesmo serem levados a morte, mas isso vai depender do tempo de exposição desses peixes aos campos elétricos das barreiras de dissuasão (Cowx e Lamarque, 1990).

Além disso, uma vez que o efeito do campo elétrico em um organismo é diretamente proporcional ao tamanho e volume do organismo (Sternin *et al.*, 1976; Miranda, 2009), peixes pequenos podem ser menos afetados por campos elétricos do que peixes maiores, devido à capacidade diminuída da eletricidade em imobilizar peixes à medida que se tornam menores em tamanho, inferindo que as barreiras elétricas existentes podem não ser tão eficazes em dissuadir peixes pequenos em relação a indivíduos maiores (Reynolds, 1996; Dolan e Miranda, 2003), havendo assim a necessidade em descobrir quais os limiares de eletrosensibilidade em peixes jovens e compará-los aos limiares de eletrosensibilidade dos peixes adultos de uma mesma espécie, para se padronizar níveis de tensão elétrica que seja efetiva, tanto para os peixes adultos e maiores, quanto para os peixes menores e mais jovens.

Assim, no primeiro capítulo desta tese foi determinado, experimentalmente, os limiares de eletrosensibilidade para curimba (*Prochilodus lineatus*), pacu (*Piaractus mesopotamicus*) e piapara (*Megaleporinus obtusidens*). Além disso, diferenças nesses limiares entre as espécies foram avaliadas. Já, no segundo capítulo, foi testado o efeito do tamanho dos peixes sobre os limiares de eletrosensibilidade de adultos e juvenis de Curimba, que é uma das espécies mais afetadas por injúrias da operação de hidrelétricas em regiões neotropicais, muito citada em relatórios e estudos de mortandade íctica em turbinas e vertedouros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agostinho, AA., Júlio-Jr, HF., Borghetti, JR. Considerações sobre os impactos dos represamentos na ictiofauna e medidas para sua atenuação. Um estudo de caso: reservatório de Itaipu, Revista UNIMAR. 1992; 14:89-107.

Agostinho, AA., Mendes, VP., Suzuki, HI., Canzi, C. Avaliação da atividade reprodutiva da comunidade de peixes dos primeiros quilômetros a jusante do reservatório de Itaipu, UNIMAR. 1993; 15(Supl.): 175-89.

Agostinho, AA.; Gomes, LC.; Pelicice, FM. Ecologia e manejo de recursos pesqueiros em reservatórios do Brasil. Maringá: EDUEM, 2007. 501p.

Agostinho AA., Gomes LC, Santos NCL., Ortega JCG., Pelicice FM. Fish assemblages in Neotropical reservoirs: colonization patterns, impacts and management. *Fish Res.* 2016; 173:26–36. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.04.006>.

Adams, NS., Johnson, GE., Rondorf, DW., Anglea, SM., Wik, T. Biological evaluation of the behavioral guidance structure at Lower Granite dam on the Snake River, Washington in 1998. In: Coutant, CC. *Behavioral Technologies for Fish Guidance*. 2001; 145-60.

ACRCC. Asian Carp Action Plan for Fiscal Year 2017 [Internet]. 2017. Disponível em: <http://www.asiancarp.us/documents/2017ActionPlan.pdf>.

Applegate, VC., Smith, BR., Nielsen, WL. Use of electricity in the control of sea lampreys [Internet]. U.S; 1952. Disponível em: <https://www.usgs.gov/index.php/publications/use-electricity-control-sea-lampreys-electromechanical-weirs-and-traps-and-electrical>.

Adams, NS., Johnson, GE., Rondorf, DW., Anglea, SM., Wik, T. Biological evaluation of the behavioral guidance structure at Lower Granite dam on the Snake River, Washington in 1998. In: Coutant, CC. *Behavioral Technologies for Fish Guidance*. 2001. p.145-60. CASTRO, R. M. C. Revisão taxonômica da família Prochilodontidae (Ostariophysis, Characiformes) 1990. 293f. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1990.

Bajer, PG., Claus, AC., Wein, J., & Kukulski, E. Field test of a low-voltage, portable electric barrier to guide invasive common carp into a mock trap during seasonal migrations. *Manag. Biol. Invasions*. 2018; 9(3):291-97. <https://doi.org/10.3391/mbi.2018.9.3.11>.

Baker, S. Fish screen in irrigating ditches. *Trans. Am. Fish. Soc.* 1928; 58:80–82.

Bohlin, T., Hamrin, S., Heggberget, T. G., Rasmussen, G., e Saltveit, S. J. Electro fishing—theory and practice with special emphasis on salmonids. *Hydrobiologia*, 1989; 173(1):9-43.

Cada, GF. The Development of Advanced Hydroelectric Turbines to Improve Fish Passage Survival. *Bioengineering feature*. 2001; 26(9):14-23

Canadian Electricity Association. Considering Fish and Fish Habitat in Existing Hydroelectric Operários and Manuten: Electricity Industry Practices. Ottawa, 2001. 70p.

Copp, G. Electrofishing for fish larvae and 0+ juveniles: equipment modifications for increased efficiency with short fishes. *Aquac. Res.* 1989; 20(4):453–62.

Cowx, IG; Lamarque, P. *Fishing with Electricity* Fishing News Books. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1990.

DFO. Update to the Ecological Risk Assessment of Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*) for the Great Lakes Basin: Lake Ontario [Internet]. 2017. Disponível em: <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/40596904.pdf>.

Dolan, CR, Miranda, LE. Immobilization thresholds of electrofishing relative to fish size. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2003; 132(5):969–76. <https://doi.org/10.1577/T02-055>.

Egg, L., Pander, J., Mueller, M., and Geist, J. Effectiveness of the electric fish fence as a behavioural barrier at a pumping station. *Mar. Freshw. Res.* 2019; 70(10):1459-64. <https://doi.org/10.1071/MF18459>.

Halsband, E., & Halsband, I. Electrofishing [English translation of Halsband and Halsband 1975 from German by R. W. McCauley, text only exclusive of reference list]. *Canadian Translation in Fisheries and Aquatic Sciences*. 1984; 5048.

Hill, T. D. e Willis, D. W. Influence of water conductivity on pulsed ac and pulsed dc electrofishing catch rates for largemouth bass. *N. Am. J. Fish. Manag.* 1994; 14(1):202-7.

Holliman, FM. Operational protocols for electric barriers on the Chicago Sanitary and Ship Canal: influence of electrical characteristics, water conductivity, behavior, and water velocity on risk for breach by nuisance invasive fishes. Final report submitted to US Army Corps of Engineers, Chicago District [Internet]. 2011. Disponível em: <https://www.csu.edu/cerc/researchreports/documents/AsianCarpDispersalBarrierEfficacyStudy2011.pdf>.

Holliman, FM., Killgore, KJ., and Shea, C. Development of Operational Protocols for Electric Barrier Systems on the Chicago Sanitary and Ship Canal: Induction of Passage-Preventing Behaviors in Small Sizes of Silver Carp. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center [Internet]. 2015. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA623170.pdf>.

Johnson, NS., Thompson, HT., Holbrook, C., Tix, JA. Blocking and guiding adult sea lamprey with pulsed direct current from vertical electrodes. *Fish. Res.* 2014; 150:38–48. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.10.006>.

Johnson, NS., Miehl, S., O'Connor, LM., Bravener, G., Barber, J., Thompson, H., Tix, JA., Bruning, T. A portable trap with electric lead catches up to 75% of an invasive fish species. *Sci. Rep.* 2016; 6:(28430). <https://doi.org/10.1038/srep28430>.

Jones, PE., Tummers, JS., Galib, SM., Woodford, DJ., Hume, JB., Silva, LG. M., Braga, RR., Leaniz, CG., Vitule, JRS., Herder, JE., Lucas, MC. The use of barriers to limit the spread of aquatic invasive animal species: A global review. *Front. ecol. evol.* 2021; 9:1–19. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.611631>.

Junho, RAC. Migrações ascendentes de peixes neotropicais e hidrelétricas: proteção a jusante de turbinas e vertedouros e sistemas de transposição. [Tese de doutorado]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2008.tde-09022009-183724>.

Jungwirth, M. River continuum and fish migration— going beyond the longitudinal river corridor in understanding ecological integrity. In Jungwirth, M., S. Schmutz & S. Weiss (eds), *Fish Migration and Fish Bypasses*. Blackwell Sciences Ltd. Fishing News Books, Oxford, London, Berlin: 1998; 19–32.

- Katopodis, C., Koon, EM., Hanson, L. Sea lamprey barriers: new concepts and research needs. Report of an alternative control research workshop held in Minneapolis: Minnesota [Internet]. 1994. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/biology/nsaec/fishxing/fplibrary/Katopodis%20and%20others-1994.pdf>.
- Kim, J., Mandrak, NE. Effects of vertical electric barrier on the behaviour of Common Carp. *Manag. Biol. Invasion*. 2017; 8(4):497–505. <https://doi.org/10.3391/mbi.2017.8.4.04>.
- Kim, J., Mandrak, NE. Effects of a vertical electric barrier on the behaviour of Rainbow Trout. *Aquat. Ecosyst. Health Manag.* 2019; 22:183–92. <https://doi.org/10.1080/14634988.2019.1624135>.
- Königson, S., Fjälling, A. and Lunneryd, SG. Reactions in individual fish to strobe light. Field and aquarium experiments performed on whitefish (*Coregonus lavaretus*). *Hydrobiologia*. 2002; 483:39-44. <https://doi.org/10.1023/A:1021342520542>.
- Larinier, M. Environmental Issues, Dams and Fish Migration. Dams, fish and fisheries. FAO Fisheries Technical Paper. 2001; 419(166):45-90.
- Lopes, RE. Estudo de Barreiras Elétricas para Impedimento de Entrada de Peixes em Turbinas Hidráulicas. Tese de doutorado, Minas Gerais-UFMG. 2009; 166p.
- Machut, L., Limburg, K., Schmidt, R., Dittman, D. Anthropogenic Impacts on American Eel Demographics in Hudson River Tributaries, New York. *Transactions of The American Fisheries Society – Trans. Amer. Fish. Soc.* 2007; 136:1699-1713. 10.1577/T06-140.1.
- Miranda, LE. Standardizing electrofishing power for boat electrofishing: chapter 14, in *Standard Methods for Sampling North American Freshwater Fishes*, Bonar, S.A., Hubert, WA. and Willis, DW (eds.), Bethesda, MD: Am. Fish. Soc. 2009; 223–30.
- Miller, M., de Bie, J., Sharkh, SM., and Kemp, PS. Behavioural response of downstream migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to electric fields under static and flowing water conditions. *Ecol. Eng.* 2021; 172:106397. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106397>.
- Nelson, JS., Grande, TC., Wilson, MVH. *Fishes of the world*. 5rd ed. New York: John Wiley and Sons; 2016.
- Noatch, MR., Suski, CD. Non-physical barriers to deter fish movements. *Environmental Reviews*. 2012; 20(1):71–82. <https://doi.org/10.1139/a2012-001>.
- Pavlov, DS. Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. Institute of the Evolutionary Morphology and Ecology of Animals: FAO Fisheries Technical Paper, 1989; 108p.
- Parker, AD., Glover, DC., Finney, ST., Rogers, PB., Stewart, JG., Simmonds Jr., RL. Direct observations of fish incapacitation rates at a large electrical fish barrier in the Chicago Sanitary and Ship Canal. *J. Great Lakes Res.* 2015; 41(2):396–404. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.03.004>.

- Parasiewicz; P., Wiśniewolski; W., Mokwa; M., Ziola; S., Prus; P., Godlewska; M. A low-voltage electric fish guidance system—NEPTUN. *Fish. Res.* 2016; 181:25-33. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.03.015>.
- Reis RE., Albert JS., Di Dario F., Mincarone, MM., Petry, P., Rocha, LA. Fish biodiversity and conservation in South America. *J Fish Biol.* 2016; 89(1):12–47. <https://doi.org/10.1111/jfb.13016>.
- Reynolds, JB. Electrofishing. In: Murphy BR, Willis DW (eds.), *Fisheries Techniques*, 2nd Ed. Bethesda, Maryland: Amer. Fish. Soc. 1996; 221–53.
- Silva, FNA. Efeito de Campo Elétrico no Comportamento de Peixes Brasileiros e Estudo de Barreira Elétrica Como Mecanismo de Controle de Movimentação de Peixes. Dissertação de Mestrado, área de estudo: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade da Energia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. 2010; 122p.
- Sternin, VG., Nikonorov, IV., and Bumeister, YK. *Electrical fishing: Theory and practice*. (English translation), Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1976.
- Stoot, LJ., Gibson, DP., Cooke, SJ., and Power, M. Assessing the potential for using low-frequency electric deterrent barriers to reduce lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) entrainment. *Hydrobiologia*. 2018; 813:223–35. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3533-z>.
- Therrien, J. & Bourgeois. G. Fish Passage at Small Hydro Sites. Report by Genivar Consulting Group for CANMET Energy Technology Centre, Ottawa. Québec City, Québec Canada. 2000.
- Taft, EP.; Dixon, DA; Sullivan, CW. Electric Power Research Institute's (EPRI) research on behavioral technologies. 2001; 115-124p. In: Coutant, C.C. (Ed.). *Behavioral technologies for fish guidance*. Amer. Fish. Soc., Bethesda, Maryland, 193p.
- Tonella, LH., Ruaro, R., Daga, VS., Garcia, DAZ., Vitorino, OB., Magalhães, T., Reis, RE., Di Dario, F., Petry, AC., Mincarone, MM., Montag, MM., Pompeu, PS., Teixeira, AAM., Carmassi, AL., Sánchez, AJ., Giraldo Pérez, A., Bono, A., Datovo, A., Flecker, AS., Lucena, ZMS. Neotropical Freshwater Fishes: A dataset of occurrence and abundance of freshwater fishes in the Neotropics. *Ecology*. 2023; 104(4):3713. <https://doi.org/10.1002/ecy.3713>.
- Weber, MJ., Thul, MD., Flammang, M. Effectiveness of pulsed direct current at reducing walleye escapement from a simulated reservoir. *Fish. Res.* 2016; 176:15-21. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.021>.
- Wiśniewolski W., Engel J. (red.), *Restoring migratory fish and connectivity of rivers in Poland*. Wyd. IRS, Olsztyn, 2006; 81p.
- Yalçinkaya, T., Çakır, A., Bolat, Y., Uysal, R., Aslantas, A. Electric fish barrier for protecting small carps in Eğirdir lake. *Technical Gazette*. 2017; 24(6):1641-46. <https://doi.org/10.17559/TV-20150917105429>.

CAPÍTULO I. Estimativas dos limiares de eletrosensibilidade como medida para repulsão de peixes em tubos de sucção de usinas hidrelétricas

Josias Batista Neves^{1,2}

Éder André Gubiani^{1,2,3,4}

Dirceu Baumgartner^{4,5}

1 Graduação em Engenharia de Pesca, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Rua da Faculdade, 85903-000 Toledo, PR, Brazil. (JBN) jbn_pesca@hotmail.com, (ÉAG)

Eder.Gubiani@unioeste.br, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4981-0955>

2 Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Rua da Faculdade, 85903-000 Toledo, PR, Brazil. (JBN)

jbn_pesca@hotmail.com, (ÉAG) Eder.Gubiani@unioeste.br, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4981-0955>

3 Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Rua Universitária 2069, 85819-110 Cascavel, PR, Brazil.

Eder.Gubiani@unioeste.br, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4981-0955>

4 Grupo de Pesquisas em Recursos Pesqueiros e Limnologia, Instituto Neotropical de Pesquisas Ambientais. Rua da Faculdade, Jardim La Salle, 85903-000 Toledo, PR, Brazil. (ÉAG)

Eder.Gubiani@unioeste.br, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4981-0955>, (DB) baum.d@hotmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9943-6290>

5 Programa de Pós-Graduação em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900 Maringá, PR, Brazil. (DB)

baum.d@hotmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9943-6290>

RESUMO

Barreiras comportamentais se caracterizam por alterar o comportamento de certas espécies de peixes, evitando o deslocamento de espécies invasoras e impedindo que peixes migradores entrem no canal de fuga das usinas e adentrem o tudo de sucção, direcionando-os para rotas de passagem alternativas. A escolha da tecnologia utilizada para evitação de peixes, depende de fatores como espécies alvo, condições de instalação e condições do local. Esse estudo teve como objetivo determinar as respostas comportamentais geradas por incidência de campo elétrico (eletrosensibilidade) em juvenis de três espécies de peixes migradoras neotropicais; *Prochilodus lineatus* (curimba), *Piaractus mesopotamicus* (pacu) e *Megaleporinus obtusidens* (piapara), sob incidência de uma barreira comportamental elétrica e estática com uso de corrente alternada, onda senoidal e frequência elétrica de 60 Hz. Para avaliar se existiram diferenças

significativas entre os níveis das eletrosensibilidades das espécies foi aplicada uma MANOVA aos valores das tensões elétricas desenvolvidas a cada um dos limiares de reação (sensibilidade, agitação, paralisia e tempo de resiliência). Para o caso de diferenças significativas nessa análise foi aplicada uma ANOVA separadamente para cada variável associada a um teste de Tukey, que realizou comparações múltiplas entre as médias dos diferentes grupos para identificar quais foram significativamente diferentes entre si. Entre os exemplares da mesma espécie, não houveram diferenças significativas nas eletrosensibilidades. No entanto, entre as três espécies, *P. lineatus* se mostrou mais tolerante aos campos elétricos apresentando tensões maiores para todos os limiares de eletrosensibilidade e tempos de resiliência mais curtos. *P. mesopotamicus* e *M. obtusidens* foram mais sensíveis aos campos elétricos e tiveram tempos de resiliência mais extensos, sendo que *M. obtusidens* foi a espécie mais afetada pelas tensões elétricas, abreviando as respostas de eletrosensibilidade e postergando a retomada das condições iniciais após a realização dos testes. Devido a especificidade das respostas de eletrosensibilidade em cada espécie, parâmetros operacionais, efeitos em espécies não-alvo e como esses efeitos dependem do tamanho do organismo, ainda existem grandes lacunas nas informações sobre a eficácia das barreiras elétricas para a grande maioria das espécies de peixes, e nosso estudo é um dos primeiros trabalhos que leva em conta o uso de barreiras comportamentais elétricas como ferramenta de manejo e proteção de estoques de peixes neotropicais reofílicos em regiões de operações de usinas hidrelétricas.

Palavras-chave: Barreira comportamental, barreira elétrica, evitação de peixes em turbinas, peixes neotropicais em turbinas.

CHAPTER I. Estimates of electrosensitivity thresholds as a measure for fish repulsion in hydroelectric power plant suction pipes

SUMMARY

Behavioral barriers alter the behavior of certain fish species, preventing the movement of invasive species and preventing migratory fish from entering the tailrace of power plants and the suction tube, directing them to alternative passage routes. The choice of technology used for fish avoidance depends on factors such as target species, installation conditions, and site conditions. This study aimed to determine the behavioral responses generated by the incidence of an electric field (electrosensitivity) in juveniles of three Neotropical migratory fish species: *Prochilodus lineatus* (curimba), *Piaractus Mesopotamicus* (pacu) and *Megaleporinus obtusidens* (piapara) under the influence of an electrical and static behavioral barrier using alternating current, a sinusoidal wave, and an electrical frequency of 60 Hz. To assess whether there were significant differences between the species' electrosensitivity levels, a MANOVA was applied to the electrical voltage values developed at each of the reaction thresholds (sensitivity, agitation, paralysis, and resilience time). In the case of significant differences in this analysis, an ANOVA was applied separately for each variable associated with a Tukey test, which performed multiple comparisons between the means of the different groups to identify which were significantly different from each other. Among specimens of the same species, there were no significant differences in electrosensitivity. However, among the three species, *P. lineatus* was more tolerant to electric fields, presenting higher voltages for all electrosensitivity thresholds and shorter resilience times. *P. mesopotamicus* and *M. obtusidens* were more sensitive to electric fields and had longer resilience times, with *M. obtusidens* being the species most affected by electrical voltages, shortening the electrosensitivity responses and delaying the return to baseline conditions after testing. Due to the specificity of electrosensitivity responses in each species, operational parameters, effects on non-target species, and how these effects depend on organism size, there are still significant gaps in information on the effectiveness of electric barriers for the vast majority of fish species. Our study is one of the first to consider the use of electric behavioral barriers as a management and protection tool for rheophilic Neotropical fish stocks in regions where hydroelectric power plants operate.

Keywords: Behavioral barrier, electrical barrier, fish avoidance in turbines, neotropical fish in turbines.

INTRODUÇÃO

Ao desempenhar a reotaxia (movimento dos peixes contra o fluxo do rio) e reofilia (movimento migratório para reprodução), os peixes poderão se deparar com algumas ameaças a sua sobrevivência ao encontrarem um aproveitamento hidrelétrico em seu caminho (Junho, 2008). Esse movimento ascendente, acaba acarretando no acúmulo de peixes no sopé das barragens, vindo a desencadear outros impactos, tais como a mortandade de peixes em turbinas hidráulicas e vertedouros (Agostinho *et al.*, 1993). Quando os peixes são atraídos pelo escoamento contínuo de água provenientes das turbinas, ocorre o avanço dos indivíduos pelo tubo de sucção das usinas. Através desse acesso, os peixes entram em contato com os componentes da turbina, ficando aprisionados em locais apertados nos quais sofrem com baixas concentrações de oxigênio, variações súbitas de pressão, choque e compressão contra as pás das turbinas, desorientação devido a alta turbulência e, conseqüentemente, ficam suscetíveis a predadores (Agostinho *et al.*, 1992; Cada, 2001).

Diversas estratégias têm sido utilizadas com a finalidade de evitar peixes nas áreas de risco de usinas hidrelétricas. Segundo Therrien e Bourgeois (2000), as estratégias podem ser classificadas em quatro diferentes categorias: desvios, barreiras físicas ou estruturais, barreiras comportamentais e sistemas de captura e transposição. Dentre essas alternativas, uma bastante promissora é o uso de barreiras comportamentais. Esse tipo de estratégia se destaca, por alterar o comportamento de certas espécies, fazendo-as evitar áreas de risco (Noatch e Suski, 2012). Nesses casos, ocorre a repulsão e direcionamento de peixes por meio de estímulos comportamentais, impedindo que eles entrem no canal de fuga das usinas e adentrem o tudo de sucção, direcionando-os para rotas de passagem alternativas (Adams *et al.*, 2001; Noatch e Suski, 2012; Weber *et al.*, 2016). Para alcançarem seus objetivos, as barreiras comportamentais aproveitam-se da aguçada e ampla sensibilidade dos peixes e as diferentes respostas a estímulos que ocorrem no meio aquático, o que interfere principalmente em sua comunicação e orientação. A escolha da tecnologia utilizada dependerá de fatores como espécies alvo, condições de instalação e condições do local. A utilização de luzes estroboscópicas, cortina de bolhas, ondas sonoras, barreiras de velocidade, hipóxia, hipercapnia, compostos químicos e barreiras elétricas, são alternativas de barreiras comportamentais de dissuasão de peixes conhecidas.

Dentre essas tecnologias, se destaca a utilização de campos elétricos por meio do uso de barreiras elétricas. Essas barreiras se utilizam de uma resposta comportamental dos peixes à

aplicação de campos elétricos, chamada de eletrosensibilidade. Isso se deve, a capacidade desses organismos serem sensíveis às correntes elétricas que são aplicadas na água em consequência do teor salino de seus fluidos corpóreos, o que os torna bons condutores de eletricidade, facilitando a propagação do campo elétrico no meio aquático e causando interferência no comportamento natural dos peixes (Katopodis *et al.*, 1994). Dessa forma, as barreiras elétricas tornaram-se um instrumento de dissuasão de peixes em canal de fuga de usinas hidrelétricas e demais áreas de risco (Königson *et al.*, 2002).

A utilização da corrente elétrica como fonte de dissuasão tem uma longa história na gestão dos recursos pesqueiros, ganhando recentemente mais interesse, devido ao aumento do número de espécies invasoras (ACRCC, 2017; DFO, 2017), e do acentuado crescimento das operações hidrelétricas em rios de todo o mundo. Pesquisas e aplicações de campos elétricos em peixes tem se concentrado, na última década, em ações para restringir o deslocamento de espécies não nativas invasoras, como carpas asiáticas (Holliman, 2011; Holliman *et al.*, 2015), lampreias marinhas adultas (Johnson *et al.*, 2014; Johnson *et al.*, 2016), o Walleye (Weber *et al.*, 2016), a carpa comum (Kim & Mandrak, 2017; Bajer *et al.*, 2018) e a truta arco-íris (Kim & Mandrak, 2019); bem como na proteção de estoques de peixes importantes em tomadas de usinas hidrelétricas e estações de bombeamento de água, como carpas (Yalçinkaya *et al.*, 2017), o esturjão do lago (Stoot *et al.*, 2018), peixes diversos (Egg *et al.*, 2019) e a enguia europeia (Miller *et al.*, 2021).

Esses trabalhos, em sua grande maioria, discorreram sobre o uso de campos elétricos e barreiras elétricas em algumas poucas espécies de peixes dos rios e dos Grandes Lagos Laurencianos do hemisfério norte, principalmente, nos Estados Unidos e Canadá. Regiões em que essa estratégia de dissuasão de peixes tivera suas primeiras aplicações a quase 100 anos com Baker (1928), e posteriormente na década de 50 com Applegate *et al.* (1952), quando se utilizaram da corrente alternada (AC) para bloquear e guiar a lampreia marinha invasora *Petromyzon marinus*. Apesar da longa história de sucesso no uso das barreiras elétricas como ferramenta de manipulação comportamental de peixes, poucos são os registros de estudos e aplicações dessa ferramenta como mecanismo de manejo e mitigação de impactos da atividade hidrelétrica sobre espécies de peixes de outras regiões onde se tem maior riqueza de espécies quando se comparado às regiões onde as barreiras elétricas mais tem se desenvolvido.

Informações sobre a eficácia das barreiras elétricas, configurações de campo elétrico, espécies-alvo, tamanho de peixe e comportamento, ainda são limitadas para muitas espécies e, em alguns casos, desconhecidas (Reynolds, 1996; Noatch & Suski, 2012; Johnson *et al.*, 2014; Parker *et al.*, 2016; Johnson *et al.*, 2016; ACRCC, 2017; DFO, 2017). Na região Neotropical,

ocorre a maior diversidade de peixes de água doce do mundo, com 4235 espécies descritas (Tonella *et al.*, 2023) e estimativas predizem aproximadamente 9.000 espécies (Reis *et al.*, 2016), representando cerca de 28% do total das espécies de peixes existentes, em grande parte, originárias das bacias do Amazonas e do Paraná (Nelson *et al.*, 2016).

Apesar do escoamento de água proveniente do tubo de sucção das usinas atrair invariavelmente todo o tipo de peixe, os peixes neotropicais reofilicos são os organismos mais impactados pelos barramentos, entretanto, praticamente não existe avaliações sobre contenção de peixes com o uso de campos elétricos nessa região biogeográfica, apesar da proteção desses estoques serem fundamentais. Portanto, o estudo da eletrosensibilidade e das barreiras elétricas são uma importante iniciativa para a implantação de uma ferramenta de manejo visando limitar e modificar o comportamento dessas espécies de peixes dentro das barragens neotropicais, especialmente às brasileiras, mantendo suas populações.

Além do mais, para que a operação das barreiras elétricas sobre os peixes seja eficiente, é necessário que os limites de eletrosensibilidade dos indivíduos sejam conhecidos previamente, no intuito de que o campo elétrico aplicado nunca ultrapasse os limiares de risco determinados para as espécies. Se ultrapassados, os peixes podem ficar atordoados, se tornando presas fáceis ou até mesmo serem levados a morte, mas isso vai depender do tempo de exposição desses peixes aos campos elétricos das barreiras de dissuasão (Cowx e Lamarque, 1990). Desse modo, a configuração e implantação de barreira elétrica está diretamente relacionada com a sua atuação e eficácia sobre as espécies de peixes que se tem como alvo (Dolan & Miranda, 2003).

Considerando que a influência do campo elétrico em um organismo é proporcional ao seu tamanho e volume (Sternin *et al.*, 1976; Miranda, 2009), os peixes pequenos, ao atravessarem as telas físicas das barreiras tradicionais e avançarem pelo tubo de sucção das barragens (Calles *et al.*, 2010; Kemp *et al.*, 2012), acabam sendo menos impactados por campos elétricos em comparação aos peixes de maior porte. Isso se deve à menor capacidade da eletricidade em paralisar peixes à medida que seu tamanho diminui, sugerindo que as barreiras elétricas existentes podem não ser tão eficazes em inibir peixes pequenos quanto indivíduos maiores, para os quais são estudadas e desenvolvidas (Reynolds, 1996; Dolan & Miranda, 2003). Portanto, é necessário esclarecer os limites de eletrosensibilidade em peixes juvenis, a fim de estabelecer níveis de tensão elétrica que também sejam eficazes para peixes menores e mais jovens como para os adultos e maiores. Ou seja, invariavelmente, peixes menores são menos suscetíveis à corrente elétrica. Dessa maneira, este estudo teve o propósito de mapear as linhas de tensão de um campo elétrico AC que atua sobre uma barreira vertical em um canal

experimental e, por meio das leituras de tensão elétrica, buscou-se conhecer os limiares de eletrosensibilidade de cada espécie e possíveis diferenças nesses limiares dentro e entre as espécies estudadas, *Prochilodus lineatus* (Curimba), *Piaractus mesopotamicus* (Pacu) e *Megaleporinus obtusidens* (Piapara). Assim, esse trabalho propõe determinar se as três espécies juvenis avaliadas possuem os mesmos limiares de eletrosensibilidades.

MATERIAL E MÉTODOS

Delineamento experimental

Os ensaios transcorreram em um Delineamento Inteiramente Casualizado – DIC, com três níveis (espécies) e 10 repetições (exemplares), em que cada peixe testado constituiu-se de uma réplica da espécie em estudo. Os espécimes foram testados individualmente, a fim de se obter resultados pontuais dos limiares de eletrosensibilidade em função das tensões elétricas que atuam sobre seus corpos. Para o desenvolvimento experimental foram utilizados peixes na fase de alevinos (tamanho variando de quatro a seis centímetros de comprimento padrão), de três espécies nativas da bacia do rio Paraná, *Prochilodus lineatus*, *Piaractus mesopotamicus* e *Megaleporinus obtusidens*.

Canal de testes e disposição dos eletrodos condutores

Para os ensaios de determinação da eletrosensibilidade dos peixes foi utilizado um aquário de vidro (Figura 1a). Esse tipo de aparato construído nesse material, além de propiciar a visualização de todas as respostas eletrosensíveis dos peixes em seu interior, por sua translucidez característica, também proporciona total isolamento da corrente elétrica que se propaga no interior do canal. Nas extremidades longitudinais do canal foram alocados os eletrodos (Figura 1b), de maneira que os peixes avaliados ficaram confinados entre a disposição desse par de condutores elétricos. Esses componentes foram construídos em forma de grade, usando o cobre como metal condutor. A principal razão para o uso desse material nesse sistema é sua excelente condutividade elétrica. Além disso, o cobre apresenta a resistência elétrica mais baixa entre todos os metais não-preciosos, o que maximiza a transferência da energia elétrica para o sistema do canal de testes.

O arranjo dos eletrodos foi construído com filetes espaçados na vertical e na horizontal formando um tipo de grade nas duas extremidades do canal (Figura 1c). Essa configuração buscou maximizar a intensidade do campo elétrico aplicado homogeneamente pelo canal,

ampliando, portanto, a afetividade das respostas dos limiares de eletrosensibilidade dos peixes, sem que fosse necessária a construção de uma placa sólida para cobrir toda a face menor do canal em ambas as extremidades.

Distribuição e mapeamento das linhas de campo elétrico

No intuito de compreender melhor a distribuição do campo elétrico no aquário de testes, foram realizadas leituras das posições das linhas de tensão elétrica entre o arranjo de eletrodos. Para isso, o aquário de testes foi subdividido em quadrantes de cinco centímetros, tanto na longitude do aquário, como também na latitude, com o intuito de mapear toda a região sob influência do campo elétrico e facilitar as leituras dessas linhas de tensões que atuaram sobre o fluido e sobre os peixes nos ensaios (Figura 1b).

Nos testes de verificação da distribuição das linhas de campo elétrico foi ligado o gerador de tensões (varivolt) na rede elétrica convencional e alimentado com tensão elétrica de 220V, o que garante a condição de utilização da amplitude máxima de tensão ofertada pelo equipamento.

Para a energização do par de eletrodos do aquário, cabos condutores partindo do varivolt foram conectados, em que, um recebeu a tensão teste de 150V e o outro a tensão de 0V. Dessa forma, gerou-se uma diferença de potencial entre os eletrodos, verificada com o auxílio da leitura de um multímetro digital ajustado para medir tensões de corrente alternada. A diferença de potencial mensurada entre o ânodo e o cátodo foi anotada para posterior análise do comportamento das linhas de tensão elétrica atuantes no aquário. Para as leituras, uma das pontas de prova do multímetro foi fixada no eletrodo que estava carregado e a outra ponta de prova do aparelho foi fixada junto a uma barra condutora do mesmo material dos eletrodos. Com essa barra, percorreu-se o aquário tomando todas as leituras de tensão de cinco em cinco centímetros, totalizando a profundidade de 45 cm de toda a região alagada do aquário de testes e percorrendo também pelo comprimento de todo o aquário mapeando as linhas de tensão elétrica e a diferença de potencial existente conforme se percorria o aquário.



FIGURA 1. a) vista frontal do aquário de testes, b) disposição dos eletrodos condutores pelo aquário de testes, c) leitura das linhas de tensão elétrica no interior do aquário.

Escolha das espécies

Para a experimentação foram escolhidas três espécies de peixes neotropicais, *Prochilodus lineatus*, vulgarmente conhecida como curimba (Figura 2a), *Piaractus mesopotamicus* (pacu) (Figura 2b) e *Megaleporinus obtusidens* (piapara) (Figura 2c). A escolha dessas espécies deu-se, principalmente, pela presença comum dessas em áreas próximas a barragens de usinas hidrelétricas, devido as suas características reofílicas e migradoras, fazendo com que se tornem espécies alvo de medidas de manejo e conservação. Desse modo, para que não sejam atraídas para os ductos de sucção e saídas de água das turbinas, são bons modelos para experimentação com eletrosensibilidade e barreira elétrica.

Além do mais, para tais espécies existe amplo conhecimento difundido de manejo em laboratório e facilidade de obtenção de exemplares homogêneos (em peso e comprimento) em sistemas de recrias, o que favorece a realização dos experimentos.



FIGURA 2. Biometria das espécies a) *P. lineatus*, b) *P. mesopotamicus* c) *M. obtusidens*.

Manejo dos peixes em laboratório

Os peixes foram adquiridos de uma propriedade comercial de Toledo/PR, e transportados para o laboratório da EPAA (ou InPAA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, também localizada em Toledo. No laboratório, os peixes foram alocados em um viveiro de concreto com dimensões de 2,80m x 0,87m x 0,60m (Figura 3). As espécies foram separadas em três seções desse tanque por uma estrutura de malha telada, resultando numa área com cerca de 0,80m² com 10 alevinos por “baia” (Figura 4). Essa configuração no viveiro permitiu que todos os organismos tivessem as mesmas condições presentes nesse ambiente, antes dos ensaios.

Durante o período da realização do experimento, os peixes foram alimentados duas vezes ao dia, com ração comercial farelada própria para esse estágio de vida dos animais. Antes de cada nova alimentação foi realizado o sifonamento do viveiro de manutenção dos peixes para a retirada dos resíduos da alimentação anterior e dos dejetos gerados pelo metabolismo dos peixes, garantindo as condições adequadas da água desses viveiros para a manutenção dos peixes.

No dia anterior aos testes, a alimentação dos peixes foi suspensa por aproximadamente 12 horas. Essa estratégia teve como objetivo purificar os animais, prevenindo que seus excrementos interferissem de maneira significativa em algumas variáveis da qualidade da água do aquário de testes, sendo a condutividade elétrica um exemplo. Essa variável é crucial, pois impacta diretamente os testes de eletrosensibilidade, devido à concentração de íons no meio aquático e do peixe (Miranda & Dolan, 2003).

Para assegurar a uniformidade dos testes e garantir condições semelhantes para todos os peixes submetidos à avaliação, utilizou-se a mesma água que estava no aquário, a qual foi acrescida de cerca de um litro de água proveniente dos viveiros de manutenção durante o transporte e aclimação dos peixes à água dos testes. Além disso, antes dos testes de cada indivíduo, foram medidas no aquário, algumas variáveis essenciais da qualidade da água: pH, temperatura, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido, se houvesse variação súbita dessas variáveis, uma parcela de renovação da água limpa seria transferida para o aparato experimental, a fim de reduzir o estresse dos animais, garantir sua homeostase ao ambiente e uniformidade aos testes.



FIGURA 3. Viveiro de manutenção dos peixes.



FIGURA 4. Viveiro de manutenção dos peixes dividido em seções, conforme o número de espécies avaliadas.

Metodologia aplicada aos ensaios

Os testes de eletrosensibilidade ocorreram com anuência do Comitê de Ética no Uso de Animais - CEUA/UNIOESTE, sob o protocolo 06-21 (Material suplementar S1). Cada espécime foi selecionado aleatoriamente dentro da sua espécie e transferido para o canal de teste. Antes da ativação da estrutura experimental, foi realizado um período de espera de cinco minutos, tempo esse em que verificamos ser suficiente para permitir que o peixe se adaptasse às condições do aquário e mostrasse estar tranquilo, sendo que, esse comportamento foi padronizada em nossos testes como o comportamento normal ou natural dos peixes, para posterior comparação com as demais alterações do comportamento dos peixes quando submetidos ao campo elétrico.

Após esse intervalo de adaptação, o sistema foi energizado e os testes tiveram início, com a tensão sendo aumentada gradativamente no varivolt, volt a volt. Neste processo, foram monitoradas as leituras no multímetro nos momentos exatos em que os diferentes limiares do campo elétrico, correspondentes a cada nível de reação, eram alcançados. Uma vez atingido o último limiar de eletrosensibilidade, que corresponde ao limiar de paralisia, o sistema foi

desligado e iniciou-se a contagem (em segundos) do tempo de recuperação do indivíduo até que ele pudesse retornar as suas funções naturais, como as de antes do teste. Em seguida o peixe foi retirado do canal de testes e então foram tomadas as medidas do seu comprimento total, comprimento padrão e peso. Posteriormente, transportado para um viveiro de repouso.

Ao longo de todos os ensaios, foram avaliadas algumas variáveis físicas e químicas da água que podem interferir nas reações dos peixes e nos resultados dos testes de barreira elétrica estática, a fim de verificar se existiam diferenças significativas nas medições dessas variáveis, sendo elas: Temperatura da Água ($^{\circ}\text{C}$), Saturação (%), Oxigênio Dissolvido (mg/L), Condutividade Elétrica ($\mu\text{s/cm}$), Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$) e Potencial Hidrogeniônico (pH).

Corrente elétrica e frequência aplicada aos peixes

Os ensaios de eletrosensibilidade dos peixes transcorreram com a aplicação de corrente alternada (AC), onda senoidal e frequência elétrica de 60 Hz. Isso se deu por meio da ligação dos eletrodos de cobre a um autotransformador variável, permitindo a elevação da tensão aplicada de forma gradual, volt a volt (Figura 5). Dessa forma, foi possível observar pontualmente quais foram os momentos em que os peixes passaram pelas três respostas de eletrosensibilidade (sensibilidade, agitação e paralisia), sendo então registrado os limiares de eletrosensibilidade para cada resposta dos peixes.



FIGURA 5. Autotransformador variável (Gerador de tensões).

Eletrosensibilidade e tempo de resiliência

A evolução progressiva dos campos elétricos nos peixes gera três níveis de tensão elétrica, cada um correspondendo a uma resposta específica do animal. As reações dos peixes diante da aplicação do campo elétrico foram observadas visualmente e registradas através de filmagens, correlacionando os movimentos musculares ondulatórios dos alevinos ao valor de tensão no instante exato da resposta. Isso permitiu a identificação de três limiares de

eletrosensibilidade. Limiar de Sensibilidade, que é a primeira reação visível no comportamento do peixe quando é submetido a primeira exposição ao campo elétrico alternado; Limiar de Agitação, quando o peixe se agita freneticamente, ficando visivelmente incomodado com a corrente elétrica, aumentando seus batimentos operculares e não conseguindo manter uma posição de conforto no aquário, com perda de orientação natatória e Limiar de Paralisia, ocorre na maior tensão aplicada e suportada pelo peixe. Nessa fase o campo elétrico provoca o enrijecimento dos músculos, não sendo possível visualizar nenhum batimento opercular ou qualquer outro tipo de movimentação muscular no peixe (Cowx & Lamarque, 1990).

Ao término de cada ensaio, foi registrado o tempo de resiliência dos peixes (em segundos), entre o fim dos testes de eletrosensibilidade após atingir o limiar de paralisia até o momento em que o peixe retoma o controle de suas atividades natatórias e respiratórias naturais.

Análise dos dados

Para avaliar se existiram diferenças significativas da eletrosensibilidade entre as espécies avaliadas foi aplicada uma análise multivariada da variância (MANOVA) aos valores das tensões elétricas desenvolvidas para atingir cada um dos limiares de reação (sensibilidade, agitação, paralisia e tempo de resiliência). Diferenças significativas nessas análises, indicam que uma análise de variância unifatorial (ANOVA) pode ser aplicada para cada variável separadamente (Johnson, 1998). Quando os pressupostos da MANOVA e ANOVA não foram atingidos, nós transformamos os dados (log) e realizamos nova análise, checando os pressupostos novamente. Caso os pressupostos, mesmo assim, não fossem atendidos, uma análise similar não paramétrica fora utilizada (Teste de Kruskal-Wallis). Após os dados atenderem aos pressupostos das análises, foi realizado ainda um teste post hoc de Tukey, para determinar quais pares de grupos apresentam diferenças significativas entre si.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software Statistica 7.0TM (StatSoft). O nível de significância adotado para todas as análises foi de $p < 0,05$.

RESULTADOS

Não houveram interferências dos fatores ambientais em nenhuma fase da experimentação, dado que, as variáveis físicas e químicas (Temperatura, Oxigênio dissolvido, Condutividade elétrica e pH) mostraram-se significativamente constantes. Além disso, os pesos e comprimentos dos peixes também não interferiram nas respostas eletrocomportamentais dos

peixes, já que esses peixes foram adquiridos em lotes padronizados em estação de alevinocultura comercial e, portanto, não apresentaram diferenças significativas entre tamanho e peso, pois todos possuíam a mesma idade.

Distribuição e mapeamento das linhas de tensão elétrica

As leituras do campo elétrico que percorreram o canal demonstraram, por meio das linhas de tensões geradas entre os eletrodos dispostos verticalmente, que existe uma transferência de energia para o canal em um campo elétrico homogêneo, tanto horizontalmente no aquário quanto na sua vertical, o que maximiza os efeitos da corrente elétrica aplicada sobre os peixes e valoriza as respostas eletrocomportamentais dos espécimes avaliados (Figura 6).

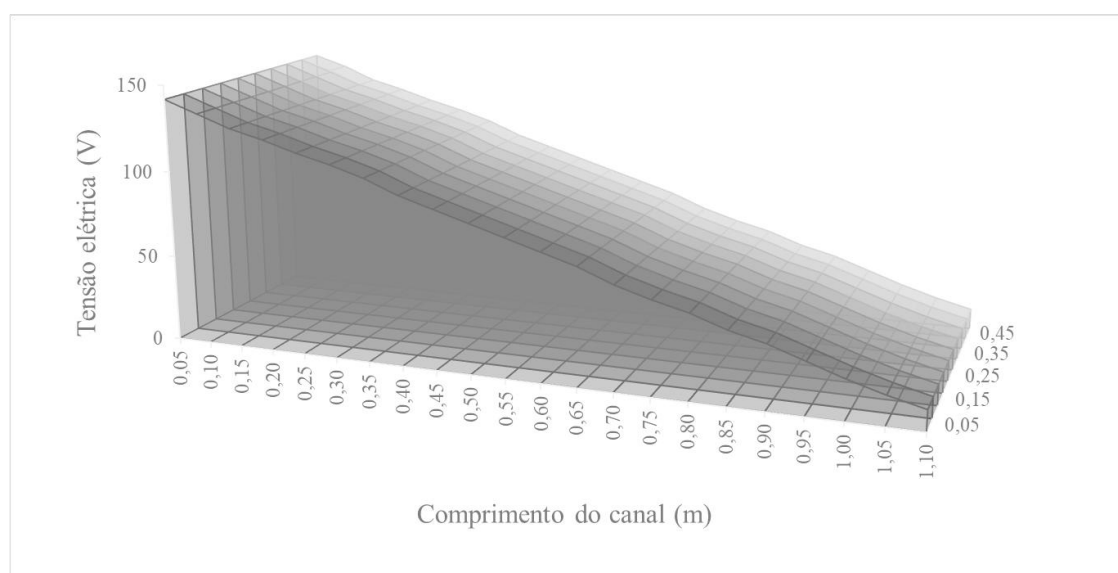


FIGURA 6. Comportamento das linhas de tensão elétrica gerada pelo par de eletrodos no interior do canal.

Campo elétrico alternado (AC) onda senoidal e frequência elétrica de 60 Hz

Nesse estudo, a aplicação de uma barreira elétrica vertical e estática com arranjo de Corrente Alternada (AC), onda senoidal e frequência elétrica de 60 Hz, mostrou-se eficaz como ferramenta de indução comportamental involuntária na determinação dos três limiares de eletrosensibilidade esperados para peixes neotropicais atingindo o limiar de sensibilidade, o limiar de agitação e o limiar de paralisia. Todos os 30 exemplares testados, das três espécies, atingiram respostas eletrocomportamentais compatíveis aos testes de eletrosensibilidade padrão e nenhum desses exemplares vieram a óbito em até 48 horas sob observação, após a realização dos experimentos.

Limiares de eletrosensibilidade

Os limiares de eletrosensibilidade dos peixes foram definidos para três espécies em três níveis de reação, refletindo o aumento gradual da tensão elétrica no aquário de testes. O limiar de sensibilidade foi identificado como a menor tensão necessária para que os peixes demonstrassem desconforto físico devido às tensões elétricas, com valores médios de 16,9V, 18,5V e 28,4V para *M. obtusidens*, *P. mesopotamicus* e *P. lineatus* respectivamente (Tabela I). Por outro lado, o limiar correspondente à maior tensão testada foi o de paralisia, registrando 193,2V para *P. lineatus*, 157,8V para *P. mesopotamicus* e 153,7V para *M. obtusidens* (Tabela I).

Dentre as espécies analisadas, duas mostraram respostas comportamentais semelhantes em relação aos campos elétricos em todos os três níveis de eletrosensibilidade, sendo elas *P. mesopotamicus* e *M. obtusidens*, com valores de sensibilidade abaixo de 20V para o limiar de sensibilidade, valores inferiores a 80V para o limiar de agitação e tensões de 150V para o último limiar determinado. Diante disso, foram identificadas diferenças significativas ($p < 0,05$) para esta variável entre as espécies (Figura 7), com destaque para *M. obtusidens* em relação à suscetibilidade aos estímulos elétricos, demonstrando distinções significativas em comparação com as demais espécies no limiar de agitação (Figura 7b). No entanto, esse padrão de comportamento não se restringiu apenas a esse limiar específico, mas se manteve ao longo da análise de todas as respostas de eletrosensibilidade, onde a espécie *M. obtusidens* sempre reagiu de forma mais rápida aos campos elétricos.

Em contraste com *M. obtusidens* e *P. mesopotamicus*, a espécie *P. lineatus* apresentou uma resposta mais tolerante à influência dos campos elétricos, apresentando limiares de eletrosensibilidade superiores aos das outras espécies (Tabela I). Isso se tornou ainda mais claro nos testes, que revelaram que *P. lineatus*, consistentemente, revelou os maiores valores de tensão em relação aos três limiares de eletrosensibilidade entre as espécies. No caso do último limiar, onde as tensões foram aumentadas até provocar a paralisia total dos movimentos voluntários dos peixes, *P. lineatus* se destacou, apresentando diferença significativa entre as demais espécies para essa resposta e o mais alto limiar de paralisia gerado no estudo (Figura 7c).

Tempo de resiliência (recuperação)

Ao observarmos os resultados dos tempos de resiliência das espécies, podemos evidenciar que não houve diferenças significativas entre os tempos de recuperação, apesar das espécies apresentarem certos padrões nas respostas de eletrosensibilidades que parecem estar

associados aos tempos de recuperação. Ou seja, quanto maiores foram os índices dos limiares de eletrosensibilidade, maiores também os tempos de recuperação dos indivíduos.

TABELA 1. Valores das tensões para os limiares de eletrosensibilidade (sensibilidade, agitação e paralisia), resultados do tempo de resiliência para *P. lineatus*, *P. mesopotamicus* e *M. obtusidens*. V= Volt; s= segundos; M= média de tensão aferida; DP= desvio padrão em torno da média de tensão aferida.

Reações	Sensibilidade (V)		Agitação (V)		Paralisia (V)		Resiliência (s)	
Espécies	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP
<i>P. lineatus</i>	28,4	11,1	94,4	23,9	193,2	31,3	21,0	27,9
<i>P. mesopotamicus</i>	18,5	15,6	79,5	9,3	157,8	18,9	29,3	32,9
<i>M. obtusidens</i>	16,9	10,1	55,8	11,2	153,7	24,6	48,0	46,4

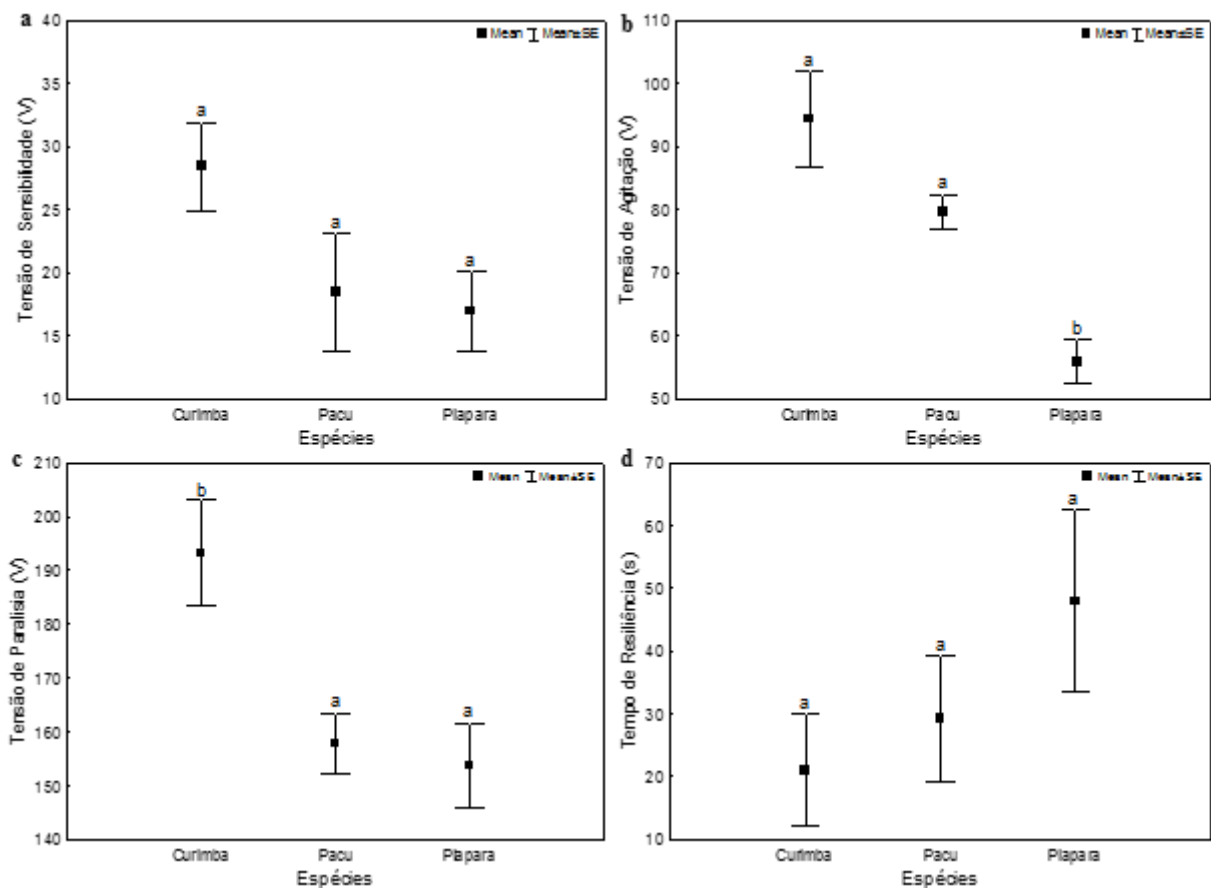


FIGURA 7. Análise de variância para as eletrosensibilidades (a) Tensão de sensibilidade; (b) de agitação; (c) de paralisia e (d) tempos de recuperação de Curimba (*P. lineatus*), Pacu (*P. mesopotamicus*) e Piapara (*M. obtusidens*), em função do campo elétrico desenvolvido. As letras na parte superior das barras de dispersão da média, remetem ao teste de Tukey para os limiares de eletrosensibilidade das espécies. Quando letras diferentes entre elas, denotam existir diferenças significativas entre as eletrosensibilidades das espécies com $p < 0,05$, se letras iguais, não há diferença estatística entre as eletrosensibilidades para essas espécies.

DISCUSSÃO

A efetividade de testes de eletrosensibilidade e barreiras elétricas se deve, principalmente, a capacidade dos peixes de enfrentar um campo elétrico sem ficar incapacitado. No entanto, isso é resultado da variação de múltiplos fatores; biológicos de cada espécie (comprimento total do peixe), ambientais (temperatura, condutividade e velocidade da água) e variações de campo elétrico (corrente, gradiente de tensão, pulso e frequência) (Holliman, 2011; Holliman *et al.*, 2015). Desse modo, nossos resultados evidenciaram não haver diferenças significativas para as variáveis físicas e químicas aferidas na água do aquário de testes, bem como para o peso e comprimento dos peixes utilizados, de maneira que a hipótese testada não foi afetada por esses fatores, ou seja, características intrínsecas da espécie, que não o seu peso ou comprimento, que influenciaram nas respostas de eletrosensibilidades entre os juvenis.

Distribuição e mapeamento das linhas de tensão elétrica

O benefício de um campo elétrico homogêneo, como o campo caracterizado nesse estudo, maximiza os efeitos da corrente elétrica sobre a barreira estática, garantindo que em qualquer ponto do aquário em que os peixes estiverem durante os testes estáticos, estarão sob o efeito do campo elétrico desenvolvido. Além de que, no caso da execução, as barreiras elétricas dispostas com eletrodos verticais possuem ainda a grande vantagem de serem portáteis, de instalação rápida e sem grandes modificações no fluxo do canal em que forem instaladas (Johnson *et al.* 2014). O que as torna a melhor opção de barreira comportamental elétrica quando se pensa em evitar peixes em tomadas de água e tubo de sucção de usinas hidrelétricas.

Para peixes juvenis é imprescindível que as barreiras elétricas sejam mais eficazes, pois peixes dessa idade são menos afetados pelos campos elétricos que peixes adultos. Isso porque em geral, peixes maiores têm maior voltagem corporal do que peixes menores, ou seja, absorvem mais corrente elétrica, dado que a tensão total experimentada por um peixe é proporcional ao seu comprimento, tornando-se mais suscetíveis à imobilização induzida por eletrochoque que peixes menores (Emery, 1984; Dolan & Miranda, 2003; Parker *et al.*, 2013). Desse modo, a compreensão do comportamento do campo elétrico no sistema que integra o canal experimental facilitou as leituras da distribuição das linhas de tensão e auxiliou na interpretação do comportamento dos peixes e na determinação dos seus limiares de eletrosensibilidade.

Campo elétrico alternado (CA/AC) onda senoidal e frequência elétrica de 60 Hz

A resposta fisiológica dos peixes às barreiras elétricas é variável devido à interação dos diferentes parâmetros do campo elétrico (ou seja, tipo de corrente, intensidade do campo, largura de pulso e frequência), (Beaumont *et al.*, 2000; Miranda e Kidwell, 2010). Diferentemente dos campos alternados utilizados nesse estudo, alguns autores sugerem outros tipos de configurações para os testes de eletrosensibilidade e aplicações de barreiras elétricas. Reynolds e Klotz (2012), por exemplo, afirmaram que nas tensões de corrente contínua pulsada (PDC) as polaridades não se invertem, reduzindo os efeitos negativos de ferimentos e morte de peixes. Ou ainda, devido aos campos elétricos PDC serem projetados com gradientes de tensão gradualmente crescentes, permitem aos peixes modificarem seu comportamento e evitarem a barreira antes de se tornarem incapacitados em regiões de maior intensidade (Johnson *et al.*, 2014). Contudo, a operação de barreiras de fonte contínua ainda é um grande desafio, sobretudo em locais onde o fluxo de água é turbulento. Nessas regiões, a eficácia dos dissuasores elétricos pode ser extremamente afetada, como verificado nos estudos de Miller *et al.* (2021), quando submeteram a enguia europeia adulta a campos PDC e Miehl *et al.* (2017), submetendo as lampreias marinhas juvenis em movimento a jusante para o mesmo tipo de corrente elétrica e os resultados foram limitados.

Em função disso, para as proximidades dos tubos de sucção de usinas hidrelétricas onde o fluxo de água é mais agitado, certos níveis de tensões alternadas (AC) são mais indicadas para barreiras comportamentais elétricas. Essas tensões afetam o sistema nervoso central dos peixes, produzindo neles um estado de eletronarcole, essa condição faz com que os peixes sejam paralisados e, logo, expulsos das proximidades das turbinas por meio do fluxo que deságua do sistema, dificultando a entrada deles pelo grupo gerador da usina. Outra prerrogativa dos campos alternados é a possibilidade de tetania a maiores distâncias dos eletrodos, reação de narcose elétrica antecipada e a inexistência de eletrotaxex (reação de atração), como é o caso da corrente contínua. Garantindo assim, maior eficiência de barreira e também maior segurança para peixes neotropicais expostos a esse tipo de corrente elétrica (Silva *et al.*, 2009).

Logo, campos alternados senoidais à frequência elétrica de 60Hz, configuração de campo utilizada nesse estudo, são eficientes e indicadas para possíveis barreiras comportamentais elétricas que pretendem afastar indivíduos juvenis de tomadas de usinas hidrelétricas e demais áreas de risco desses empreendimentos. Sendo que, essa configuração de campo elétrico para as realidades brasileiras, é uma estratégia mais vantajosa que outras

utilizadas amplamente no restante do mundo. Isso se deve a simplicidade de instalação e custo reduzido dessa energia, pois representa o tipo de corrente e frequência padrão do Sistema Elétrico do Brasil, o que torna a aplicação dessa estratégia comportamental nos empreendimentos hidrelétricos de todo país relativamente simples e barata.

Limiares de eletrosensibilidade

A forma de onda, a frequência e a largura do pulso são conhecidas por afetar a resposta dos peixes aos campos elétricos (Beaumont *et al.*, 2000; Miranda e Kidwell, 2010). A falta de padronização no uso dos diferentes parâmetros do campo elétrico para a aplicação e o estudo das barreiras elétricas, dificulta o comparativo entre os resultados e respostas dos diversos estudos de barreiras elétricas realizados em todo mundo. Um único consenso que pode ser verificado nos estudos é que os tamanhos dos peixes influenciam as respostas de eletrosensibilidade na espécie e entre as espécies.

Independente dos parâmetros utilizados nos estudos de eletrosensibilidade, os peixes quando expostos ao campo elétrico apresentam sempre três respostas principais, que são os limiares de eletrosensibilidade. Miller *et al.*, (2021) em condições de água estática, induziram a enguia europeia a três respostas fisiológicas de eletrosensibilidade (contração, perda de orientação e tetania) por meio do uso de ondas pulsadas curtas e baixa frequência. Nossos resultados corroboraram as tensões alternadas e frequência elétrica de 60 Hz, com três limiares de eletrosensibilidade para as espécies, nas quais foi observado diferenças significativas entre elas, principalmente para *M. obtusidens*, que sempre correspondeu aos campos elétricos com celeridade em todos os limiares de eletrosensibilidade testados, se mostrando diferente das demais espécies significativamente no limiar de agitação.

A espécie *P. mesopotamicus* demonstrou média tolerância à atuação dos campos elétricos, apesar do corpo comprimido, porém mais alto, caracteriza a maior área de contato do corpo com o campo elétrico desenvolvido entre as outras duas espécies avaliadas, no entanto, possui similaridade aos limiares de eletrosensibilidade das outras espécies, de maneira que não apresentaram diferença significativa no limiar de sensibilidade, foram estatisticamente iguais ao limiar de agitação de *P. lineatus* e estatisticamente igual ao limiar de paralisia de *M. obtusidens*. Contrariamente a *M. obtusidens* e *P. mesopotamicus*, os juvenis de *P. lineatus* mostraram comportamento mais tolerante a ação dos campos elétricos, com limiares de eletrosensibilidade maiores que das outras duas espécies, especialmente às dos juvenis de *M. obtusidens*, mesmo apresentando características físicas muito próximas (Tabela I).

Dado os resultados das três espécies avaliadas nesse estudo, evidenciamos que não somente os pesos e comprimentos dos peixes são determinantes para os resultados de eletrosensibilidade, haja vista que, houveram diferenças significativas entre as espécies avaliadas, mesmo estas padronizadas quanto às medidas biométricas, inferindo que outras características fenotípicas intrínsecas da espécie também influenciam e são fundamentais para esses resultados entre os juvenis.

Lopes, (2009) ao testar indivíduos juvenis de curimba (*Prochilodus lineatus*) e mandi amarelo (*Pimelodus maculatus*), verificou respostas ao campo elétrico muito diferente, de modo que *P. lineatus* foi menos susceptível a aplicação de campo que *P. maculatus*. Isso pode ser fruto da diferença entre características morfométricas dessas duas ordens de peixes. Como *P. maculatus* não possui escamas, sua resistividade é menor que a de *P. lineatus* que as possui, além do mais, o formato da seção reta do corpo *P. maculatus*, oferece uma área líquida maior que a de *P. lineatus* para um mesmo comprimento dos peixes. No entanto, variações da eletrosensibilidade também foram verificadas entre os peixes desse presente estudo, não havendo uma padronização das respostas de eletrosensibilidade entre os grupos de peixes avaliados, ainda que as três espécies testadas sejam da ordem dos Characiformes, indicando portanto que, características próprias das espécies sejam responsáveis pelas respostas de eletrosensibilidade tão particulares e não parâmetros de ordem ou família.

Tempo de resiliência (recuperação)

Estratégias comportamentais de fonte elétrica em peixes, por meio do efeito de campos PDC, são mais vantajosas, pois possuem menores tempos de recuperação se comparadas às tensões alternadas (Bird & Cowx, 1993). Isso ocorre, devido ao efeito dos campos elétricos PDC serem menos “agressivos” para os peixes, ou seja, os peixes são menos impactados por esse tipo de campo. Contudo, a garantia de tempos de recuperação menores refletidos do comparativo entre arranjos de barreiras elétricas de dissuasão, não bastam para validar o uso de uma ou outra configuração de campo elétrico. Uma vez que, o tempo de recuperação abreviado pode simplesmente refletir a falta de eficiência desse arranjo elétrico na barreira comportamental e, mesmo em área de barreira, os peixes podem avançar rumo a regiões de perigo eminente, como os canais de fuga e os tubos de sucção de usinas hidrelétricas. Isso pode vir a acontecer principalmente, no caso de peixes de tamanho reduzido, já que a tensão total experimentada por um peixe está diretamente relacionada ao seu comprimento (Parker *et al.*, 2013, 2015, 2016). Nesses casos necessitando, portanto, de uma fonte de eletricidade segura

para os peixes, mas que garanta também segurança e efetividade da barreira elétrica, pois um campo elétrico eficaz é aquele que afasta as espécies de peixes de áreas de risco.

Tendo em vista as configurações elétricas usadas no presente estudo, as respostas dos tempos de resiliência corroboram com os resultados dos limiares de eletrosensibilidade das espécies. Tornando-se claro, quando notamos que os maiores tempos de resiliência entre as espécies foram de *M. obtusidens*, que se mostrou mais sensível aos campos elétricos quando comparada às outras espécies, tendo todos os limiares de eletrosensibilidade antecipados e recuperação tardia do estímulo da corrente elétrica que passa por seu corpo.

Contrariamente ao que ocorre com *M. obtusidens*, *P. lineatus* apresentou rápido retorno às suas funções naturais após o alcance do limiar de paralisia, o que sugere sua maior tolerância aos campos elétricos alternados. Não obstante, *P. mesopotamicus*, apesar de ser a espécie com maior área de contato com o campo elétrico da barreira, não foi a espécie mais sensível aos campos elétricos e nem teve os maiores tempos de resiliência entre as demais, o que também sugere que, essas respostas são inerentes das espécies e de suas interações com o campo elétrico desenvolvido, ficando difícil de distinguir, quais fatores, além dos associados ao caráter fenotípico da espécie, podem influenciar quando os indivíduos têm tamanhos e formatos similares.

CONCLUSÕES

Conclui-se com esse estudo que um campo elétrico de ondas alternadas e frequência elétrica de 60 Hz sobre uma barreira elétrica vertical foi eficaz em inibir o movimento de três espécies de peixes neotropicais reofílicas em condições de laboratório. Sob condições de água estática, as espécies exibiram três respostas fisiológicas principais (sensibilidade, agitação e paralisia) em intensidades de campo elétrico distintas.

Não houveram diferenças significativas entre as eletrosensibilidades dos indivíduos da mesma espécie, no entanto, apesar de todos os peixes terem a mesma idade, entre as espécies avaliadas ocorreram diferenças significativas das suas eletrosensibilidades, demonstrando o comportamento intrínseco de cada espécie quando exposta a campos elétricos. Sendo que *P. lineatus* se mostrou mais tolerante aos campos elétricos, apresentando tensões mais elevadas para os limiares de eletrosensibilidade e tempos de resiliência mais curtos, enquanto, *P. mesopotamicus* e *M. obtusidens* foram mais sensíveis aos campos elétricos e demonstraram

valores de tensões reduzidos e tempos de recuperação mais extensos, com destaque para *M. obtusidens*, espécie mais sensível dentre as três.

Embora existam diversos estudos anteriores de barreiras elétricas que se concentraram principalmente em restringir o movimento de peixes como a lampreia marinha (Swink, 1999), carpa comum (Verrill e Berry, 1995) e carpas asiáticas (Sparks *et al.*, 2010; Parker *et al.*, 2016) ainda existem grandes lacunas nas informações sobre a eficácia das barreiras elétricas, particularmente no que diz respeito aos parâmetros operacionais, efeitos em espécies não-alvo e como os efeitos dependem do tamanho do organismo (Egly *et al.*, 2021). Nosso estudo é um dos primeiros trabalhos de determinação dos limites de tolerância de peixes neotropicais à campos elétricos e, apesar de tratar apenas de peixes juvenis, esses dados podem servir de base para outros estudos de barreira elétrica para peixes adultos, haja vista que os limiares de peixes juvenis serão as condições mais extremas em que a barreira pode ser configurada, podendo ser ajustada em menores tensões quando a finalidade for afastar apenas indivíduos adultos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACRCC. Asian Carp Action Plan for Fiscal Year 2017 [Internet]. 2017. Disponível em: <http://www.asiancarp.us/documents/2017ActionPlan.pdf>
- Adams, NS., Johnson, GE., Rondorf, DW., Anglea, SM., Wik, T. Biological evaluation of the behavioral guidance structure at Lower Granite dam on the Snake River, Washington in 1998. In: Coutant, CC. Behavioral Technologies for Fish Guidance. 2001. p.145-60.
- Agostinho, AA., Mendes, VP., Suzuki, HI., Canzi, C. Avaliação da atividade reprodutiva da comunidade de peixes dos primeiros quilômetros a jusante do reservatório de Itaipu, UNIMAR. 1993; 15(Supl.): 175-89.
- Agostinho, AA., Júlio-Jr, HF., Borghetti, JR. Considerações sobre os impactos dos represamentos na ictiofauna e medidas para sua atenuação. Um estudo de caso: reservatório de Itaipu, Revista UNIMAR. 1992; 14(Supl.): 89-107.
- Agostinho, AA., Pelicice FM., Gomes, LC. Dams and the fish fauna of the Neotropical region: impacts and management related to diversity and fisheries. Braz. J. Biol. 2008; 68 (4, Suppl.):1119-1132. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000500019>.
- Andrade F., Prado IG., Loures RC., Godinho AL. Evaluation of techniques used to protect tailrace fishes during turbine maneuvers at Três Marias Dam, Brazil. Neotrop. Ichthyol. 2012; 10(4):723-730. <https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400005>.
- Applegate, VC., Smith, BR., Nielsen, WL. Use of electricity in the control of sea lampreys [Internet]. U.S; 1952. Disponível em: <https://www.usgs.gov/index.php/publications/use-electricity-control-sea-lampreys-electromechanical-weirs-and-traps-and-electrical>.

- Bajer, PG., Claus, AC., Wein, J., & Kukulski, E. Field test of a low-voltage, portable electric barrier to guide invasive common carp into a mock trap during seasonal migrations. *Manag. Biol. Invasions*. 2018; 9(3): 291-97. <https://doi.org/10.3391/mbi.2018.9.3.11>.
- Baker, S. Fish screen in irrigating ditches. *Transactions of the American Fisheries Society* 58. 1928; 80–82.
- Beaumont, WRC., L le, MJ., Rouen, MA. An evaluation of some electrical waveforms and voltages used for electric fishing; with special reference to their use in backpack electric fishing gear. *J. Fish Biol.* .2000; 57(2): 433–44. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2000.tb02182.x>.
- Bird, DJ & Cowx, IG. The selection of suitable pulsed currents for electric fishing in freshwater. *Fisheries Research*. 1993; 18: 363-76.
- Cada, GF. The development of advanced hydroelectric turbines to improve fish passage survival. *Fisheries*. 2001; 26(9): 14- 23.
- Calles, O., Olsson, IC., Comoglio, C., Kemp, PS., Blunden, L., Schmitz, M., Greenberg, LA. Applied issues: size-dependent mortality of migratory silver eels at a hydropower plant, and implications for escapement to the sea. 2010; *Freshw Biol.* 55(10): 2167–180. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2010.02459.x>.
- Cowx, IG & Lamarque, P. *Fishing with Electricity*. Oxford: Fishing News Books, Blackwell Scientific Publications; 1990.
- Davis, JJ., LeRoy, JZ., Shanks, MR., Jackson, PR., Engel, FL., Murphy, EA., Baxter, CL., Trovillion, JC., McInerney, MK., Barkowski, NA. Effects of tow transit on the efficacy of the Chicago Sanitary and Ship Canal Electric Dispersal Barrier System. *J Great Lakes Res*. 2017; 43:1119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.08.013>.
- Dettmers, JM., Boisvert, B., Barkley, T., Sparks, RE. Potential Impact of Steel-Hulled Barges on Movement of Fish Across an Electric Barrier to Prevent the Entry of Invasive Carp Into Lake Michigan. *Aquatic Ecology Technical Report*. 2005.
- DFO. Update to the Ecological Risk Assessment of Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*) for the Great Lakes Basin: Lake Ontario [Internet]. 2017. Disponível em: <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/library-bibliotheque/40596904.pdf>.
- Dolan, CR., Miranda, LE. Immobilization thresholds of electrofishing relative to fish size. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2003; 132(5):969–76. <https://doi.org/10.1577/T02-055>.
- Egg, L., Pander, J., Mueller, M., Geist, J. Effectiveness of the electric fish fence as a behavioural barrier at a pumping station. *Mar. Freshw. Res.* 2019; 70(10):1459-64. <https://doi.org/10.1071/MF18459>.
- Egley, RM., O'Shaughnessey, EM., and Keller, RP. Updated occurrence data and species distribution modeling of the invasive amphipod *Apocorophium lacustre* in North America. *Freshw. Sci.* 2021; 40(1):162–174. <https://doi.org/10.1086/713071>.
- Emery L. The physiological effects of electrofishing. *Fisheries Academy, U. S. Fish and Wildlife Service, National Fisheries Center-Leetown, Cal-Neva Wildlife* [Internet]. 1984.

Disponível

em:

https://www.wildlifeprofessional.org/western/transactions/transactions_1984_11.pdf.

Holliman, FM. Operational protocols for electric barriers on the Chicago Sanitary and Ship Canal: influence of electrical characteristics, water conductivity, behavior, and water velocity on risk for breach by nuisance invasive fishes. Final report submitted to US Army Corps of Engineers, Chicago District [Internet]. 2011. Disponível em: <https://www.csu.edu/cerc/researchreports/documents/AsianCarpDispersalBarrierEfficacyStudy2011.pdf>.

Holliman, FM., Killgore, KJ., and Shea, C. Development of Operational Protocols for Electric Barrier Systems on the Chicago Sanitary and Ship Canal: Induction of Passage-Preventing Behaviors in Small Sizes of Silver Carp. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center [Internet]. 2015. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA623170.pdf>.

Johnson DE. Applied Multivariate Methods for Data. Johnson/Duxbury Press; New York. 1998.

Johnson, NS., Miehl, S. Guiding out-migrating juvenile Sea Lamprey (*Petromyzon marinus*) with pulsed direct current. River. Res. Appl. 2014; 30(9):1146–56. <https://doi.org/10.1002/rra.2703>.

Johnson, NS., Thompson, HT., Holbrook, C., Tix, JA. Blocking and guiding adult sea lamprey with pulsed direct current from vertical electrodes. Fish. Res. 2014; 150:38–48. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.10.006>.

Johnson, NS., Miehl, S., O'Connor, LM., Bravener, G., Barber, J., Thompson, H., Tix, JA., Bruning, T. A portable trap with electric lead catches up to 75% of an invasive fish species. Sci. Rep. 2016; 6:(28430). <https://doi.org/10.1038/srep28430>.

Junho, RAC. Migrações ascendentes de peixes neotropicais e hidrelétricas: proteção a jusante de turbinas e vertedouros e sistemas de transposição. [Tese de doutorado]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2008.tde-09022009-183724>.

Katopodis, C. Analysis of ichthyomechanical data for fish passage or exclusion system design. Proc. Int'l Fish Physiology Symposium, July 16–21, 1994, American Fisheries Society and Fish Physiology Association: Vancouver, BC. 1994; 318–23.

Katopodis, C., Koon, EM., Hanson, L. Sea lamprey barriers: new concepts and research needs. Report of an alternative control research workshop held in Minneapolis: Minnesota [Internet]. 1994. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/biology/nsaec/fishxing/fplibrary/Katopodis%20and%20others-1994.pdf>.

Kemp, PS., Anderson, JJ., Vowles, AS. Quantifying behaviour of migratory fish: application of signal detection theory to fisheries engineering. Ecol. Eng. 2012; 41:22–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.013>.

Kim, J., Mandrak, NE. Effects of vertical electric barrier on the behaviour of Common Carp. Manag. Biol. Invasion. 2017; 8(4):497–505. <https://doi.org/10.3391/mbi.2017.8.4.04>.

- Kim, J., Mandrak, NE. Effects of a vertical electric barrier on the behaviour of Rainbow Trout. *Aquat. Ecosyst. Health Manag.* 2019; 22:183–92. <https://doi.org/10.1080/14634988.2019.1624135>.
- Königson, S., Fjälling, A. and Lunneryd, SG. Reactions in individual fish to strobe light. Field and aquarium experiments performed on whitefish (*Coregonus lavaretus*). *Hydrobiologia*. 2002; 483:39–44. <https://doi.org/10.1023/A:1021342520542>.
- Lopes, RE. Estudo de barreiras elétricas para impedimento de entrada de peixes em turbinas hidráulicas. [Tese de Doutorado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas gerais; (2009). Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/REPA-84GFX2>.
- Miehls, SM., Johnson, NS., and Hrodey, PJ. Test of a nonphysical barrier consisting of light, sound, and bubble screen to block upstream movement of sea lampreys in an experimental raceway. *N. Am. J. Fish. Manage.* 2017; 37(3):660–66. <https://doi.org/10.1080/02755947.2017.1308892>.
- Miller, M., de Bie, J., Sharkh, SM., and Kemp, PS. Behavioural response of downstream migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to electric fields under static and flowing water conditions. *Ecol. Eng.* 2021; 172:106397. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106397>.
- Miranda, LE. Standardizing electrofishing power for boat electrofishing: chapter 14, in *Standard Methods for Sampling North American Freshwater Fishes*, Bonar, S.A., Hubert, WA. and Willis, DW (eds.), Bethesda, MD: American Fisheries Society; 2009. p.223–30.
- Miranda, LE., Kidwell, RH. Unintended effects of electrofishing on nongame fishes. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2010; 139(5):1315–21. <https://doi.org/10.1577/T09-225.1>.
- Nelson, JS., Grande, TC., Wilson, MVH. *Fishes of the world*. 5rd ed. New York: John Wiley and Sons; 2016.
- Noatch, MR., Suski, CD. Non-physical barriers to deter fish movements. *Environmental Reviews*. 2012; 20(1):71–82. <https://doi.org/10.1139/a2012-001>.
- Parker, AD., Rogers, PB., Finney, ST., Simmonds Jr., RL. Preliminary results of fixed DIDSON evaluations at the Electric Dispersal Barrier in the Chicago Sanitary and Ship Canal. Interim Report. U.S. Fish and Wildlife Service [Internet]. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259503266_Preliminary_Results_of_Fixed_DIDSON_Evaluations_at_the_Electric_Dispersal_Barrier_in_the_Chicago_Sanitary_and_Ship_Canal.
- Parker, AD., Glover, DC., Finney, ST., Rogers, PB., Stewart, JG., Simmonds Jr., RL. Direct observations of fish incapacitation rates at a large electrical fish barrier in the Chicago Sanitary and Ship Canal. *J. Great Lakes Res.* 2015; 41(2):396–404. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.03.004>.
- Parker, AD., Glover, DC., Finney, ST., Rogers, PB., Stewart, JG., Simmonds Jr., RL. Fish distribution, abundance, and behavioral interactions within a large electric dispersal barrier designed to prevent Asian carp movement. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 2016; 73(7):1060–71. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0309>.

Reis RE., Albert JS., Di Dario F., Mincarone, MM., Petry, P., Rocha, LA. Fish biodiversity and conservation in South America. *J Fish Biol.* 2016; 89(1):12–47. <https://doi.org/10.1111/jfb.13016>.

Rêgo ACL., Prado IG., Silva TT., Loures RC., Silva RJ., Monteiro AB., Godinho AL. Peixes afetados em manobras de usinas hidrelétricas. In: Loures RC., Godinho AL., organizadores. Avaliação de risco de morte de peixes em usinas hidrelétricas. Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais. 2016; p.71-96 (Série Peixe Vivo; 5).

Reynolds, JB. Electrofishing. In: Murphy BR, Willis DW (eds.), *Fisheries Techniques*, 2nd Ed. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society; 1996. p.221–53.

Reynolds, JB., Kolz, AL Electrofishing. In: Zale AV, Parrish DL, Sutton TM (eds), *Fisheries Techniques.*, 3rd Ed. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society; 2012. p.305–61.

Silva, FNA.; Lopes, RE.; Martinez, CB. Levantamento de Curvas de Eletrosensibilidade de Peixes Brasileiros e Concepção de Barreira Elétrica para Repulsão de Peixe. Latin-American Congress On Electricity Generation And Transmission – CLAGTEE: UFMG [Internet]. 2009. Disponível em: <https://ppgee.ufmg.br/documentos/PublicacoesDefesas/923/Fl%E1vio.pdf>.

Silva, FNA. Efeito de Campo Elétrico no Comportamento de Peixes Brasileiros e Estudo de Barreira Elétrica Como Mecanismo de Controle de Movimentação de Peixes. [Dissertação de Mestrado]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8F9JUB>.

Sparks, RE., Barkley, TL., Creque, SM., Dettmers, JM., and Stainbrook, KM. Evaluation of an electric fish dispersal barrier in the Chicago Sanitary and Ship Canal. *Am. Fish. Soc. Symp.* 2010; 74:139–61.

Sternin, VG., Nikonorov, IV., and Bumeister, YK. Electrical fishing: Theory and practice. (English translation), Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1976.

Stoot, LJ., Gibson, DP., Cooke, SJ., and Power, M. Assessing the potential for using low-frequency electric deterrent barriers to reduce lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) entrainment. *Hydrobiologia.* 2018; 813:223–35. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3533-z>.

Swink, WD. Effectiveness of an electrical barrier in blocking a sea lamprey spawning migration on the Jordan River, Michigan. *N. Am. J. Fish. Manage.* 1999; 19:397–405. <https://pubs.usgs.gov/publication/1000497>.

Tonella, LH., Ruaro, R., Daga, VS., Garcia, DAZ., Vitorino, OB., Magalhães, T., Reis, RE., Di Dario, F., Petry, AC., Mincarone, MM., Montag, MM., Pompeu, PS., Teixeira, AAM., Carmassi, AL., Sánchez, AJ., Giraldo Pérez, A., Bono, A., Datovo, A., Flecker, AS., Lucena, ZMS. Neotropical Freshwater Fishes: A dataset of occurrence and abundance of freshwater fishes in the Neotropics. *Ecology.* 2023; 104(4), e 3713. <https://doi.org/10.1002/ecy.3713>.

Therrien, J, and Bourgeois, G. (2000). Fish Passage at Small Hydro Sites. Report by Genivar Consulting Group for CANMET Energy Technology Centre: Ottawa [Internet]. 2000. Disponível em: <https://www.ieahydro.org/media/42697113/Fish%20Passage%20at%20Small-hydro%20Sites.pdf>.

Verrill, DD., Berry, JRCR. Effectiveness of an electrical barrier and lake drawdown for reducing common carp and bigmouth buffalo abundances. N. Am. J. Fish. Manag. 1995; 15:137–41. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(1995\)0152.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1995)0152.3.CO;2).

Weber, MJ., Thul, MD., Flammang, M. Effectiveness of pulsed direct current at reducing walleye escapement from a simulated reservoir. Fish. Res. 2016; 176:15-21. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.021>.

Yalçınkaya, T., Çakır, A., Bolat, Y., Uysal, R. and Aslantas, A. Electric fish barrier for protecting small carps in Eğirdir lake. Technical Gazette. 2017; 24(6):1641-46. <https://doi.org/10.17559/TV-20150917105429>.

MATERIAL SUPLEMENTAR S1. Parecer do comitê de ética



Certificado Experimental no Uso de Animais em Pesquisa

Nº 10-21 - CEUA

Certificamos que a proposta intitulada “Determinação da eletrosensibilidade em peixes, como alternativa para a conservação de espécies nativas e repulsão de peixes no tubo de sucção de usinas hidroelétricas (UHEs)”, registrada com o número “06-21”, sob a responsabilidade de “Éder André Gubiani”, que envolve a produção, manutenção ou utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto humanos), para fins de pesquisa científica (ou ensino) – encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008, do decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA), e foi aprovado pelo COMITÊ DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS (CEUA) DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ (UNIOESTE), em reunião de 03/09/2021.

Finalidade	Pesquisa Científica
Vigência da autorização	17/03/2021 - 31/03/2021
Espécie/linhagem/raça	<i>Salminus brasiliensis</i> /Dourado. <i>Prochilodus lineatus</i> /Curimba. <i>Leporinus elongatus</i> /Piapara. <i>Piaractus mesopotamicus</i> / Pacu.
Nº de animais	40
Peso/idade	2-3 g/4-8 cm
Sexo	Masculino
Origem	Exemplares de uma aquicultura da região.

Prof. Dra. Luciana Oliveira de Fariña
Coordenadora do CEUA
Portaria nº 3126/2018-GRE

CAPÍTULO II. Efeito do tamanho sobre limiares de eletrosensibilidade em peixes

Josias Batista Neves^{1,2}
Éder André Gubiani^{1,2,3,4}
Dirceu Baumgartner^{4,5}

1 Graduação em Engenharia de Pesca, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Rua da Faculdade, 85903-000 Toledo, PR, Brazil. (JBN) jbn_pesca@hotmail.com, (ÉAG)

Eder.Gubiani@unioeste.br, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4981-0955>

2 Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Rua da Faculdade, 85903-000 Toledo, PR, Brazil. (JBN)

jbn_pesca@hotmail.com, (ÉAG) Eder.Gubiani@unioeste.br, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4981-0955>

3 Programa de Pós-Graduação em Conservação e Manejo de Recursos Naturais, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Rua Universitária 2069, 85819-110 Cascavel, PR, Brazil.

(ÉAG) Eder.Gubiani@unioeste.br, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4981-0955>

4 Grupo de Pesquisas em Recursos Pesqueiros e Limnologia, Instituto Neotropical de Pesquisas Ambientais. Rua da Faculdade, Jardim La Salle, 85903-000 Toledo, PR, Brazil. (ÉAG)

Eder.Gubiani@unioeste.br, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4981-0955>, (DB) baum.d@hotmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9943-6290>

5 Programa de Pós-Graduação em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900 Maringá, PR, Brazil. (DB) baum.d@hotmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9943-6290>

RESUMO

Nosso objetivo foi investigar a reação de uma espécie de peixe com diferentes tamanhos a um campo elétrico vertical, com o intuito de determinar se existiram diferenças significativas na eletrosensibilidade entre os indivíduos juvenis e os adultos da espécie. Adicionalmente, procurou-se avaliar se os períodos entre os limiares de eletrosensibilidade dos peixes adultos são menores do que os observados nos jovens. Para a realização dos experimentos, foram utilizados juvenis de *P. lineatus* (curimba), com um comprimento padrão médio de 4,4 centímetros, e adultos com um comprimento médio de 26,6 centímetros. Os testes foram conduzidos em um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), que incluiu dois níveis (juvenis e adultos), com 10 repetições para os juvenis e 28 para os adultos. A média das eletrosensibilidades observadas no grupo experimental de juvenis de *P. lineatus* foi, para o

limiar de sensibilidade, agitação e paralisia, de 28,40V (d.p. = $\pm 0,35V$), 94,40V (d.p. = $\pm 0,24V$) e 193,20V (d.p. = $\pm 0,16V$), respectivamente. A média das eletrosensibilidades observadas no grupo experimental de adultos de *P. lineatus* foi de 7,00V (d.p. = $\pm 0,31V$), 15,76V (d.p. = $\pm 0,24V$) e 66,96V (d.p. = $\pm 0,12V$), correspondendo respectivamente aos limiares de sensibilidade, agitação e paralisia. Diferenças significativas entre os grupos foram observadas, evidenciando maior sensibilidade de *P. lineatus* adultos aos campos elétricos. Os limiares de eletrosensibilidade são sempre atingidos em tensões elétricas inferiores em comparação a *P. lineatus* mais jovens. Além disso, os tempos de recuperação ressaltaram ainda mais essa diferença na resposta dos peixes aos campos elétricos, mostrando que a ação da corrente elétrica é consideravelmente mais intensa nos indivíduos de maior porte, demorando mais para retomar suas funções naturais após os testes de eletrosensibilidade. Mantendo esse padrão de resposta, adultos de *P. lineatus* apresentaram reação antecipada ao efeito do campo elétrico às reações dos juvenis. Ao realizar uma comparação das médias dos tempos de reação entre os dois grupos de *P. lineatus* utilizando o teste t de Student, revelaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$), tanto em relação às eletrosensibilidades quanto aos tempos de resposta, indicando que o tamanho dos peixes tem uma influência importante nas reações deles aos campos elétricos. O padrão observado sugere que os indivíduos mais jovens e menores são menos afetados pelos campos elétricos do que os maiores e mais velhos. Nesta pesquisa, os peixes foram expostos a uma barreira elétrica em um ambiente controlado; entretanto, o padrão encontrado para *P. lineatus* pode servir como referência para futuras implementações de barreiras elétricas em ambientes naturais. Para isso, é fundamental respeitar os limiares de tensão elétrica estabelecidos nos experimentos, a fim de não exceder os limites que os peixes conseguem suportar nem comprometer os objetivos de dissuasão da barreira elétrica.

Palavras-chave: barreira comportamental, barreira elétrica, dissuasão de curimba, limiar de eletrosensibilidade.

CHAPTER II. Effect of individual size on electrosensitivity thresholds in fish

SUMMARY

Our objective was to investigate the reaction of a fish species of different sizes to a vertical electric field, determining whether there were significant differences in electrosensitivity between juveniles and adults of the species. Additionally, we sought to assess whether the periods between electrosensitivity thresholds in adult fish are shorter than those observed in juveniles. Juvenile *P. lineatus* were used for the experiments (curimba), with an average standard length of 4.4 centimeters, and adults with an average length of 26.6 centimeters. The tests were conducted in a Completely Randomized Design (CRD), which included two levels (juveniles and adults), with 10 replicates for juveniles and 28 for adults. The mean electrosensitivity observed in the experimental group of juveniles of *P. lineatus* was, for the sensitivity threshold, agitation and paralysis, 28.40 V (s.d. = ± 0.35 V), 94.40 V (s.d. = ± 0.24 V) and 193.20 V (s.d. = ± 0.16 V), respectively. The mean electrosensitivity observed in the experimental group of adults of *P. lineatus* was 7.00 V (sd = ± 0.31 V), 15.76 V (sd = ± 0.24 V) and 66.96 V (sd = ± 0.12 V), corresponding respectively to the thresholds of sensitivity, agitation and paralysis. Significant differences were observed between the groups, evidencing greater sensitivity of adult *P. lineatus* to electric fields. Electrosensitivity thresholds are always reached at lower electrical voltages compared to younger *P. lineatus*. Furthermore, recovery times further highlighted this difference in the fish's response to electric fields, showing that the action of the electric current is considerably more intense in larger individuals, taking longer to resume their natural functions after the electrosensitivity tests. Maintaining this response pattern, adult *P. lineatus* showed an earlier reaction to the effect of the electric field than the reactions of juveniles. A comparison of the mean reaction times between the two groups of *P. lineatus* using Student's t-test revealed statistically significant differences ($p < 0.05$) in both electrosensitivity and response times, indicating that fish size has a significant influence on their reactions to electric fields. The observed pattern suggests that younger, smaller individuals are less affected by electric fields than larger, older ones. In this study, the fish were exposed to an electric barrier in a controlled environment; however, the pattern found for *P. lineatus* can serve as a reference for future implementations of electric barriers in natural environments. Therefore, it is essential to respect the electrical voltage thresholds established in the experiments, so as not to exceed the limits that the fish can withstand nor compromise the deterrent objectives of the electric barrier.

Keywords: behavioral barrier, electrical barrier, curimba deterrence, electrosensitivity threshold.

INTRODUÇÃO

O uso de campos elétricos, como forma de barreira comportamental para peixes, tem uma longa história e está baseada na transferência de uma porção de qualquer corrente elétrica aplicada à água (Reynolds, 1996). Em intensidades apropriadas, os campos elétricos podem ser um impedimento eficaz para os peixes, provocando uma resposta comportamental de evitação (Katopodis *et al.*, 1994). As barreiras elétricas atuam como sistemas de dissuasão, podendo ser usados em aplicações de manejo como barreiras para evitar que os peixes se espalhem ou para orientar os peixes para longe das fontes de mortalidade (Adams *et al.*, 2001).

A eficiência de dissuasão de uma barreira elétrica é uma interação entre vários fatores, incluindo a intensidade elétrica (gradiente de tensão) do campo, características da forma de onda, tipo de configuração da barreira (eletrodos verticais vs. eletrodos horizontais), tamanho do peixe, fisiologia e condições ambientais (Layhee *et al.*, 2016). Apesar das aplicações e publicações do uso de barreiras elétricas terem aumentado consideravelmente a partir do final da década de 1990 (Jones *et al.*, 2021), ainda existem grandes lacunas de informação sobre a eficácia das barreiras elétricas, configurações, espécies-alvo, tamanho e comportamento (Reynolds, 1996; Noatch e Suski, 2012; Johnson *et al.*, 2014; Parker *et al.*, 2015; USACE, 2015; DFO, 2017).

Estudos sobre as implicações de barreiras elétricas para peixes em diferentes estágios de vida, receberam ainda menos atenção (Layhee *et al.*, 2016). No entanto, para maximizar a eficácia de uma barreira elétrica como meio de prevenir o movimento dos peixes, é necessária uma compreensão abrangente da eletrosensibilidade das espécies e de como as espécies-alvo interagem com essa barreira (Kim e Mandrak, 2019), em diferentes tamanhos da vida do peixe. Haja vista a quantidade de energia elétrica absorvida por um peixe será máxima, quando seu corpo estiver paralelo às linhas do campo elétrico, ou seja, a intensidade elétrica total transferida para um peixe aumenta com o volume e tamanho do peixe, e menos eletricidade é frequentemente necessária para afetar peixes de corpo grande em relação a peixes de corpo menor (Dolan e Miranda, 2003; Reynolds e Kolz, 2012).

Desse modo, o tamanho do peixe torna-se um fator crítico que afeta a suscetibilidade individual à eletricidade (Reynolds e Kolz, 2012). Essa relação do tamanho do peixe em função do campo elétrico desenvolvido, sugere o potencial de barreiras elétricas para bloquear efetivamente peixes-alvo de grande porte, enquanto ainda permite o movimento de peixes de

menor porte. Tendo em vista os efeitos da eletricidade variam com o tamanho do corpo, há potencial para fornecer passagem seletiva variando a voltagem e a frequência (Layhee *et al.*, 2016), no entanto, deve-se conhecer previamente o comportamento das espécies mediante às ações dos campos elétricos, pois reduzir as configurações demais, inevitavelmente reduzirá também a eficiência do sistema de bloqueio de barreiras elétricas e aumentar, sem parâmetros referenciais, pode trazer riscos aos animais (Parker *et al.*, 2015).

Portanto, identificar as interações do campo elétrico com os diferentes tamanhos e fases da vida do peixe, pode fornecer informações importantes para os gestores que intentam usar a eletricidade como ferramenta de manejo na dissuasão de peixes. Tendo em vista a necessidade dos testes de eletrosensibilidade em peixes, que precedem os testes de barreira elétrica, utilizamos indivíduos de *P. lineatus* em duas fases do ciclo de vida; juvenis e adultos, como organismo modelo entre as espécies neotropicais reofílicas, além de ter sido a espécie juvenil que mais teve destaque dentre as outras nos resultados dos limiares de eletrosensibilidade.

Ensaio de laboratório foram conduzidos para avaliar as respostas de eletrosensibilidade de *P. lineatus* a um campo elétrico vertical com a finalidade de verificar se: (1) a eletrosensibilidade difere significativamente entre indivíduos jovens e adultos da espécie; (2) os tempos entre os limiares de eletrosensibilidade entre adultos e jovens de *P. lineatus* são estatisticamente diferentes.

MATERIAL E MÉTODOS

Delineamento experimental

Para o desenvolvimento do experimento foram utilizados juvenis e adultos de *Prochilodus lineatus* (curimba), com tamanhos médios de 4,4 e de 26,6 centímetros de comprimento padrão, respectivamente. Os ensaios transcorreram em um Delineamento Inteiramente Casualizado – DIC, com dois níveis (juvenis e adultos) e suas repetições (10 juvenis e 28 adultos), em que cada peixe testado constituiu-se uma réplica da espécie em estudo a fim de se obter resultados pontuais dos limiares de eletrosensibilidade em função das tensões elétricas que atuam sobre seus corpos.

Características da espécie alvo

A espécie de *Prochilodus lineatus* (Figura 1), se encontra amplamente distribuída nos rios das bacias Solimões-Amazonas, Tocantins, São Francisco, Paraná-Paraguai, Paraíba do Sul e Uruguai (Castro, 1990; Sivasundar, 2001). Devido a sua ampla distribuição geográfica na região neotropical, *P. lineatus* é popularmente conhecida por várias denominações: corimbatá, curimbatá, curimba, curimatã-pioa, curimatã-pacu, grumatã e papa-terra.

Pertencente a ordem dos Characiformes, família Prochilodontidae (Reis *et al.*, 2003), possui desova única por temporada com elevado número de ovócitos, fecundação externa, ausência de cuidado parental (Lowe McConnell, 1999), corpo de porte médio a grande, iliofagia e reofilia. A reprodução acontece principalmente entre outubro e abril e seus indivíduos iniciam atividade reprodutiva (L50- tamanho de primeira maturação gonadal), com cerca de 21,3 cm nos machos e 24,0 cm nas fêmeas, quando seus exemplares realizam grandes migrações ascendentes ao rio (Suzuki *et al.*, 2004).

Essa espécie neotropical tem grande importância econômica e ecológica, além de ter amplo estudo da sua biologia, fisiologia e reprodução. Apesar da carne apresentar sabor não muito delicado, a espécie é muito consumida e importante para a pesca comercial, artesanal ou de subsistência em diversas regiões do território brasileiro (Reis *et al.*, 2003; Ribas *et al.* 2025). Muitas vezes, *P. lineatus* aparece nos relatórios de perda de biomassa de peixes por mortandades massivas nas operações de Usinas Hidrelétricas, no entanto, pouco se sabe de estratégias de proteção para que essas espécies não adentrem o tubo de sucção e canais de fugas das usinas.

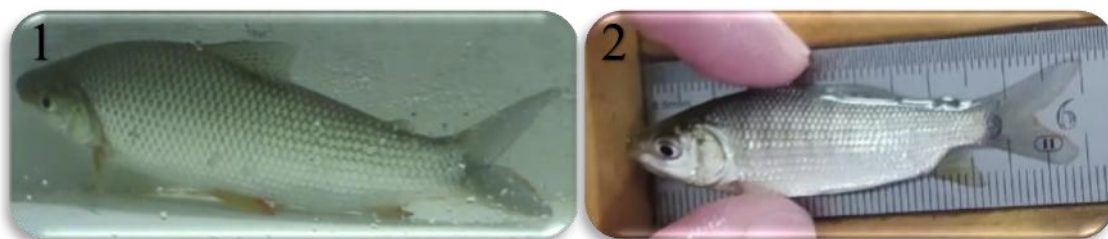


FIGURA 1. 1) Espécime de *P. lineatus* adulto; 2) Espécime de *P. lineatus* juvenil. Fonte própria

Manejo dos peixes durante o experimento

O experimento foi aprovado pelo Comitê de Ética no Uso de Animais – CEUA/UNIOESTE (Material suplementar S1 e Material suplementar S2).

Os manejos foram iniciados com os adultos de *P. lineatus* alocadas em tanques escavados de 200 m² até o momento do experimento enquanto foram alimentados diariamente com ração comercial extrusada uma vez ao dia. Quando da realização do experimento, foram alocados em tanques de alvenaria de menores dimensões (3 m²) em sistema de renovação contínua de água para a aclimação. Antes dos procedimentos, os peixes ficavam em jejum por um período de 24 horas como medida de depuração dos peixes evitando que os dejetos desses animais consigam interferir significativamente em variáveis físicas e químicas da água durante o experimento.

A manipulação dos alevinos durante as fases experimentais está descrita no capítulo I desta tese, no tópico “Manejo dos peixes em laboratório”.

Metodologia aplicada aos ensaios de eletrosensibilidade

A metodologia dos testes de eletrosensibilidade seguiram-se, exatamente iguais para indivíduos jovens e adultos de *P. lineatus* e, estão descritas no capítulo I desta tese no tópico “Metodologia aplicada aos ensaios”.

Tempo dos limiares de eletrosensibilidade

Foram avaliados os registros da experimentação (gravações de vídeo) e tomados, pontualmente, os intervalos de tempo entre o início de determinada reação de eletrosensibilidade e a sua ruptura entre um e outro limiar, no intuito de verificar se as respostas dos peixes ao campo elétrico são influenciadas, em período de tempo (segundos) e intensidade da tensão (voltz), pelo tamanho dos indivíduos dentro da mesma espécie.

Análise dos dados

Para o comparativo entre os resultados dos grupos de médias das eletrosensibilidades de juvenis e adultos de *P. lineatus* foi realizado o Teste t de Student a fim de verificar as diferenças dos limiares de eletrosensibilidade e a duração dos intervalos de tempo entre os limiares de peixes adultos e juvenis.

Para o teste t foi efetuada verificação prévia dos pressupostos de homogeneidade e homocedasticidade sobre os grupos de médias das variáveis avaliadas. Os valores de tensão elétrica dos limiares de eletrosensibilidade e os dados de tempo, da variável “Tempo de

recuperação”, não atingiram os pressupostos de homogeneidade das variâncias, sendo necessário transformar os dados originais. Para isso, optamos pela transformação na função $\log(x + 1)$ para os valores dos limiares de eletrosensibilidade e, raiz quadrada para os tempos de recuperação. Após a realização de novo teste de Levene, seguiram-se as análises sobre as variáveis transformadas. Para a variável tempo, ocorreu a transformação dos dados originais dos tempos de agitação e paralisia, na função $\log(x + 1)$.

Os demais passos e parâmetros metodológicos adotados na experimentação estão descritos no capítulo I desta tese nos tópicos “Metodologia aplicada aos ensaios”, “Corrente elétrica e frequência aplicada aos peixes”, “Eletrosensibilidade e tempo de resiliência”. Esses mesmos parâmetros valeram também para os passos experimentais dos peixes adultos.

RESULTADOS

A média das eletrosensibilidades do grupo experimental de juvenis de *P. lineatus* foram de 28,40V (d.p. = $\pm 0,35V$), 94,40V (d.p. = $\pm 0,24V$) e 193,20V (d.p. = $\pm 0,16V$) para o limiar de sensibilidade, agitação e paralisia respectivamente. A média das eletrosensibilidades do grupo experimental de adultos de *P. lineatus* foram de 7,00V (d.p. = $\pm 0,31V$), 15,76V (d.p. = $\pm 0,24V$) e 66,96V (d.p. = $\pm 0,12V$) de modo respectivo aos limiares de sensibilidade, agitação e paralisia. Análises realizadas com dados transformados $\log(x + 1)$.

A estatística do teste t comparar as médias dos limiares de eletrosensibilidade dos dois grupos resultou em t de 11,10 para o limiar de sensibilidade, t de 19,95 para agitação e um t de 21,16 para o limiar de paralisia. Esses resultados apontam que as médias dos limiares de eletrosensibilidade dos dois grupos de *P. lineatus* são significativamente diferentes ($p < 0,01$). Isso ficou bem evidenciado quando avaliamos as análises gráficas dos resultados, onde é possível verificar que a distribuição das médias dos dois grupos são distintas e, expressam a maior sensibilidade dos adultos de *P. lineatus* aos campos elétricos, com limiares de eletrosensibilidade alcançados sempre em menores tensões elétricas que *P. lineatus* mais jovens (Figura 2).

Os resultados dos tempos de recuperação evidenciaram ainda mais essa disparidade da ação dos campos elétricos sobre os tamanhos e fases distintas da vida de *P. lineatus*, onde é possível notar que a distribuição gráfica dos dados inverte-se, expressando os níveis de tolerância dos dois grupos de *P. lineatus*, de modo que os valores dos tempos recuperação

enfatazaram que o impacto das tensões elétricas sobre adultos são mais relevantes e atuaram de forma significativamente mais acentuada sobre os peixes de maior porte (Figura 2).

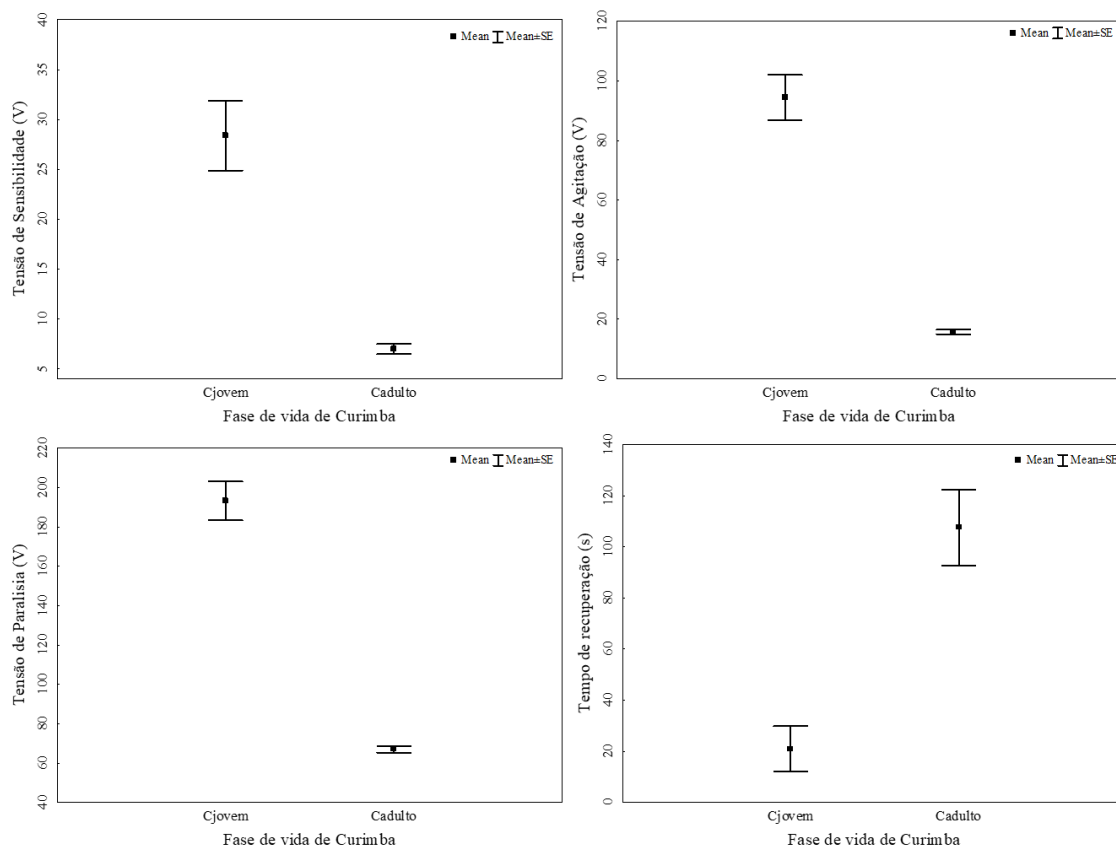


FIGURA 2. Gráfico do teste t para os valores médios de eletrosensibilidade e tempos de recuperação de *P. lineatus* juvenis e adultos (curimba). Cjovem (curimba jovem), Cadulto (curimba adulto).

Quando avaliadas as médias dos intervalos de tempos entre cada limiar de eletrosensibilidade, a fim de verificar a velocidade das reações entre os dois grupos de *P. lineatus*, ocorreu que adultos de *P. lineatus* responderam a primeira reação no tempo de 3,11s com desvio padrão (dp) de 2,7s e, passados 8,14s (d.p. = $\pm 0,36$ s) agitaram-se, paralisando aos 43,36s (d.p. = $\pm 0,26$ s) “dados transformados $\log(x + 1) * T$. paralisia”. A média dos tempos de reação para o grupo dos juvenis de *P. lineatus* foi de 5,50s (d.p. = 2,5s) para sensibilidade, 18,10s (d.p. = $\pm 0,32$ s) para agitação e 59,30s (d.p. = $\pm 0,34$ s) para paralisia.

Os resultados médios do teste t para os intervalos de tempos das reações foram um t de 2,43 e $p < 0,05$ para o limiar de sensibilidade, t de 5,80 e $p < 0,01$ para o limiar de agitação e t de 2,75 e $p < 0,01$ para a o limiar de paralisia. Esses resultados inferem haver diferença estatisticamente significativa entre as médias dos dois grupos de *P. lineatus*, sendo que o grupo

experimental dos adultos teve média do intervalo de tempo significativamente menor que o grupo dos juvenis de *P. lineatus* (Figura 3).

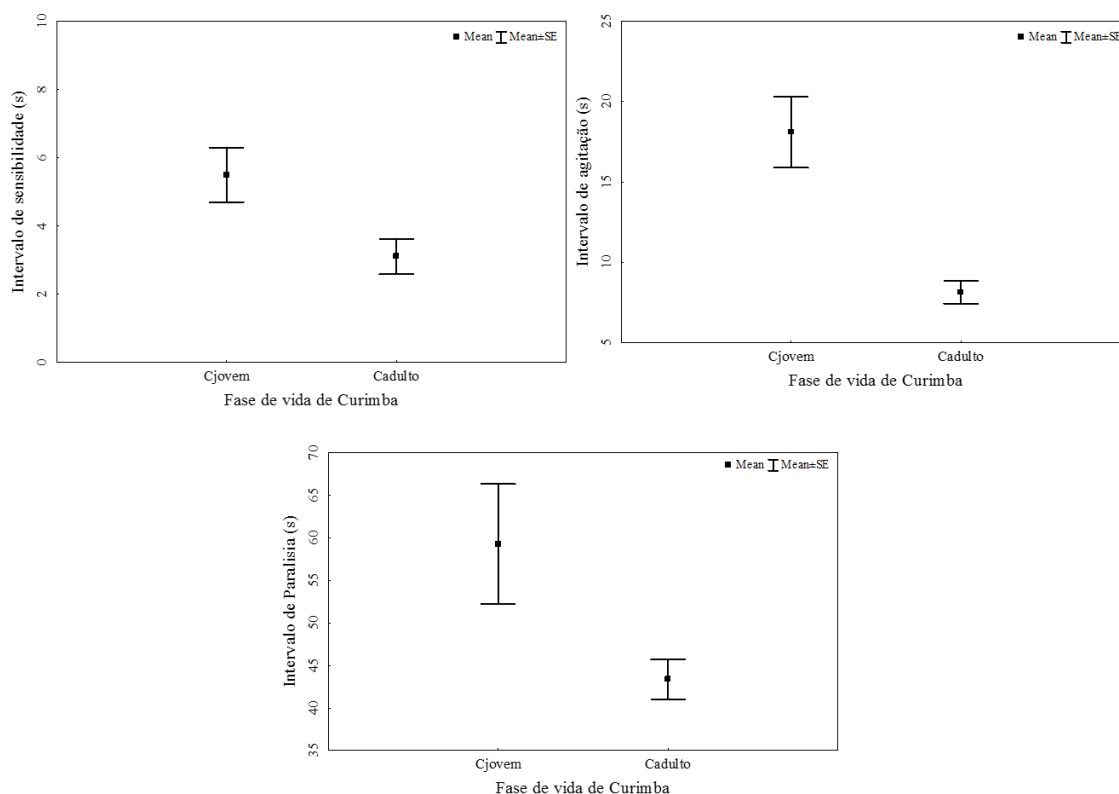


FIGURA 3. Gráficos do teste t para os valores médios dos intervalos de tempo entre os limiares de eletrosensibilidade (sensibilidade, agitação e paralisia) de *P. lineatus* juvenis e adultos. Cjovem (curimba jovem), Cadulto (curimba adulto).

DISCUSSÃO

A compreensão da interação das espécies-alvo com o campo elétrico de uma barreira de dissuasão elétrica é fundamental para avaliar sua efetividade (Kim e Mandrak, 2019). No entanto, faltam muitas informações a respeito da eficácia das barreiras elétricas quanto a configurações, espécies-alvo, tamanho do peixe, e comportamento do campo elétrico em diferentes estágios de vida (Reynolds, 1996; Noatch e Suski, 2012; Johnson *et al.*, 2014; Parker *et al.*, 2015; USACE, 2015; DFO, 2017; Jones *et al.*, 2021). Em nosso estudo verificamos que, para uma barreira elétrica vertical e estática, no uso da corrente elétrica alternada e onda senoidal na frequência elétrica de 60 Hz é possível verificar comportamentos distintos dos

peixes em função da variação da intensidade dessa corrente elétrica, dando origem a três limiares de eletrossensibilidades: limiar sensibilidade, limiar de agitação e limiar de paralisia. Esses resultados acontecem mesmo quando utilizado um campo elétrico em fases distintas da vida de *P. lineatus*.

No entanto, a quantidade de energia elétrica absorvida por um peixe será máxima quando seu corpo estiver paralelo às linhas do campo elétrico (Parasiewicz *et al*, 2016). Desse modo, o tamanho do peixe é um fator crítico que afeta a suscetibilidade individual à eletricidade (Reynolds e Kolz, 2012). Isso pode ser evidenciado em nosso estudo nos resultados dos testes de eletrosensibilidade, quando verificamos que adultos de *P. lineatus*, ou seja, os animais maiores dessa espécie, quando comparados aos juvenis de *P. lineatus*, apresentaram gradiente de tensão reduzidos em todos os limiares, enquanto que nos animais menores e mais jovens, revelaram limiares de eletrosensibilidade em intensidade de campos elétricos maiores. O efeito observado nesse estudo corrobora com as alegações de Dolan e Miranda (2003), e Reynolds e Kolz (2012), que afirmam que a intensidade elétrica total transferida para um peixe aumenta com o volume do peixe, e menos eletricidade é frequentemente necessária para afetar peixes de corpo grande que peixes menores. Isso deve-se também à condição de que o peixe, dentro da água, se torna um organismo condutor em consequência do teor salino nos fluidos corpóreos, em relação à água doce, pobre em sais, logo, o tamanho do peixe interfere significativamente nas reações de eletrosensibilidade, e, apesar de os juvenis serem indivíduos naturalmente mais frágeis que os adultos, nas reações de eletrosensibilidade isso se inverte, tornando-se indivíduos mais difíceis de serem contidos em uma barreira elétrica.

Essa relação inversa entre o tamanho do indivíduo e o gradiente de tensão do campo elétrico também fica evidente nos intervalos de tempo entre os limiares de eletrosensibilidade, através da velocidade em que os peixes se mostram sensíveis, agitados ou paralisados pela corrente elétrica desenvolvida. Assim, os peixes que responderam mais rápido à aplicação de corrente elétrica no meio aquático, ou seja, foram mais sensíveis aos campos elétricos, foram os peixes adultos, e tiveram seus intervalos de tempo entre os limiares de eletrosensibilidade encurtados. Por outro lado, *P. lineatus* em estágio mais jovem, possui os intervalos de tempo das eletrosensibilidades prolongados, refletindo a menor influência dos campos elétricos sobre peixes de menor massa e comprimento.

CONCLUSÕES

Os efeitos da eletricidade variaram com o tamanho do corpo, portanto, há potencial para fornecer passagem seletiva variando a voltagem e a frequência das configurações de uma barreira de dissuasão elétrica (Layhee *et al.*, 2016). Dessa forma, os resultados desse estudo sugerem o potencial de barreiras elétricas em bloquear efetivamente peixes-alvo de grande porte, como adultos de uma espécie, enquanto ainda permite o movimento de peixes de menor porte dessa espécie, e, de acordo com a flexibilização das tensões elétricas ofertadas na barreira comportamental é possível estabelecer passagem seletiva em função dos tamanhos dos peixes ou, no acesso de regiões que oferecem risco para as essas comunidades, barrá-los e direcioná-los para rotas alternativas com segurança.

Portanto, identificar as configurações de barreira que influenciam as taxas de passagem de alguns diferentes estágios de vida de *P. lineatus*, pode fornecer informações preciosas para gestores interessados no manejo dessa espécie numa área de risco de um reservatório, visto que a intensidade do campo elétrico desenvolvido poderá bloquear ou permitir o avanço dos peixes pelo canal de fuga das usinas. Sendo que, gradientes de campo elétrico muito elevados podem impactar negativamente os peixes maiores, contudo, restringir o alcance e a intensidade dos campos elétricos, inevitavelmente reduzirá também a eficácia da barreira no bloqueio dos peixes (Parker *et al.*, 2015).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, NS., Johnson, GE., Rondorf, DW., Anglea, SM., Wik, T. Biological evaluation of the behavioral guidance structure at Lower Granite dam on the Snake River, Washington in 1998. In: Coutant, CC. Behavioral Technologies for Fish Guidance. 2001. p.145-60. CASTRO, R. M. C. Revisão taxonômica da família Prochilodontidae (Ostariophysis, Characiformes) 1990. 293f. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1990.
- DFO. Update to the Ecological Risk Assessment of Grass Carp (*Ctenopharyngodon idella*) for the Great Lakes Basin: Lake Ontario [Internet]. 2017. Disponível em: <https://waves-vagues.dfo.mpo.gc.ca/library-bibliotheque/40596904.pdf>.
- Dolan, CR., Miranda, LE. Immobilization thresholds of electrofishing relative to fish size. Trans. Am. Fish. Soc. 2003; 132(5):969–76. <https://doi.org/10.1577/T02-055>
- Jones, PE., Tummers, JS., Galib, SM., Woodford, DJ., Hume, JB., Silva, LG. M., Braga, RR., Leaniz, CG., Vitule, JRS., Herder, JE., Lucas, MC. The use of barriers to limit the spread of aquatic invasive animal species: A global review. Front. ecol. evol. 2021; 9:1–19. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.611631>.

- Johnson, NS., Thompson, HT., Holbrook, C., Tix, JA. Blocking and guiding adult sea lamprey with pulsed direct current from vertical electrodes. *Fish. Res.* 2014; 150:38–48. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.10.006>.
- Katopodis, C., Koon, EM., Hanson, L. Sea lamprey barriers: new concepts and research needs. Report of an alternative control research workshop held in Minneapolis: Minnesota [Internet]. 1994. Disponível <https://www.fs.usda.gov/biology/nsaec/fishxing/fplibrary/Katopodis%20and%20others1994.pdf>.
- Kim, J., Mandrak, NE. Effects of a vertical electric barrier on the behaviour of Rainbow Trout. *Aquat. Health Manag.* 2019; 22:183–92. <https://doi.org/10.1080/14634988.2019.1624135>.
- Layhee; MJ., Sepulveda; AJ., Shaw; A., Smuckall; M., Kapperman; K., Reyes; A. Effects of Electric Barrier on Passage and Physical Condition of Juvenile and Adult Rainbow Trout. *J. Fish Wildl. Manag.* 2016; 7(1): 28–35. <https://doi.org/10.3996/042015-JFWM-039>.
- Lowe-McConnell, RH. Estudos Ecológicos de Comunidades de Peixes Neotropicais. Edusp, São Paulo, SP. 1999.
- Noatch, MR., Suski, CD. Non-physical barriers to deter fish movements. *Environmental Reviews.* 2012; 20(1):71–82. <https://doi.org/10.1139/a2012-001>.
- Parasiewicz; P., Wiśniewolski; W., Mokwa; M., Ziola; S., Prus; P., Godlewska; M. A low-voltage electric fish guidance system—NEPTUN. *Fish. Res.* 2016; 181:25-33. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.03.015>.
- Parker, AD., Glover, DC., Finney, ST., Rogers, PB., Stewart, JG., Simmonds Jr., RL. Direct observations of fish incapacitation rates at a large electrical fish barrier in the Chicago Sanitary and Canal. *J. Great Lakes Res* 2015; 41(2): 396-404. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.03.004>.
- Reis, RE.; Kullander, SO., Ferraris, JRCJ. Check list of the freshwater fisher of South and Central America. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2003. 742 p.
- Reynolds, JB. Electrofishing. In: Murphy BR, Willis DW (eds.), *Fisheries Techniques*, 2nd Ed. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society; 1996. p.221–53. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2259918>.
- Reynolds, JB., Kolz, AL Electrofishing. In: Zale AV, Parrish DL, Sutton TM (eds), *Fisheries Techniques.*, 3rd Ed. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society; 2012. p.305–61.
- Ribas, L., Piana, P., Henn, C., Maciel, A., Cantanhêde, G., Adames, M., Gubiani, É. Evaluating 36 years of fishing sustainability in a large reservoir. *Sci Rep.* 2025; 15:3748. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88209-8>.
- Sivasundar, A.; Bermingham, E.; Orti, G. Population structure and biogeography of migratory freshwater fishes (Prochilodus: Characiformes) in major South american rivers. *Mol. Ecol.* 2001; 10:407-417. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2001.01194.x>.
- United States Army Corps Engineers (USACE) (2015) Great Lakes and Mississippi River Interbasin Study (GLMRIS) Report. United States Army Corps of Engineers, Report to US Congress, January 6 2014, 232p.

MATERIAL SUPLEMENTAR S1. Parecer do comitê de ética para os testes de eletrosensibilidade em adultos de *Prochilodus lineatus*.



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Comitê de Ética no Uso de Animais - CEUA

PARECER DE PROTOCOLO

O protocolo intitulado "Determinação da eletrosensibilidade em peixes, como alternativa para a repulsão de peixes no tubo de sucção de Usinas Hidrelétricas (UHEs)", sob vossa coordenação, foi avaliado pelo CEUA como **APROVADO** para execução.

ATENÇÃO!

O Certificado Experimental deste Protocolo, somente será emitido após o encerramento das atividades previstas e após o encaminhamento do Relatório Final ao CEUA. Este Parecer **NÃO** tem valor como Certificado Experimental.

Cascavel, 19/06/2015

Profa. Dra. Luciana Oliveira de Fariña

MATERIAL SUPLEMENTAR S2. Parecer do comitê de ética para os testes de eletrosensibilidade em alevinos de curimba.



Certificado Experimental no Uso de Animais em Pesquisa
Nº 10-21 - CEUA

Certificamos que a proposta intitulada “**Determinação da eletrosensibilidade em peixes, como alternativa para a conservação de espécies nativas e repulsão de peixes no tubo de sucção de usinas hidroelétricas (UHEs)**”, registrada com o número “06-21”, sob a responsabilidade de “**Éder André Gubiani**”, que envolve a produção, manutenção ou utilização de animais pertencentes ao filo *Chordata*, subfilo *Vertebrata* (exceto humanos), para fins de pesquisa científica (ou ensino) – encontra-se de acordo com os preceitos da Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008, do decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009, e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA), e foi aprovado pelo COMITÊ DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS (CEUA) DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ (UNIOESTE), em reunião de 03/09/2021.

Finalidade	Pesquisa Científica
Vigência da autorização	17/05/2021 - 31/05/2021
Espécie/linhagem/raça	<i>Salminus brasiliensis</i> /Dourado. <i>Prochilodus lineatus</i> /Curimba. <i>Leporinus elongatus</i> /Piapara. <i>Piaractus mesopotamicus</i> / Pacu.
Nº de animais	40
Peso/Idade	2-3 g/4-8 cm
Sexo	Masculino
Origem	Exemplares de uma aquicultura da região.

Profa. Dra. Luciana Oliveira de Fariña
Coordenadora do CEUA
Portaria nº 3126/2018-GRE