

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA DE ÁGUA DOCE E
PESCA INTERIOR

VARIAÇÃO DO TAMANHO NA ASSEMBLEIA DE PEIXES EM
UM LAGO DE VÁRZEA NA AMAZÔNIA CENTRAL

Nágila Alexandre Zuchi

Manaus, Amazonas

Março, 2023

Nágila Alexandre Zuchi

**VARIAÇÃO DO TAMANHO NA ASSEMBLEIA DE PEIXES EM
UM LAGO DE VÁRZEA NA AMAZONIA CENTRAL**

Orientador(a): Dra. Sidinéia A. Amadio

Coorientador(a): Dra. Cristhiana Paula Röpke

Tese apresentado ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências Biológicas, área de concentração em Biologia de Água Doce e Pesca Interior

Manaus, Amazonas

Março 2023

Dedico essa tese a todos que estiveram ao meu lado ao longo de toda a caminhada acadêmica. Em especial aos meus pais, Meyber e Paulo pelo carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e FAPEAM POSGRAD.

A Amazônia não se vive, se sente. Essa foi a conclusão que cheguei após a grande oportunidade de sentir essa imensidão. Dizer que foi um privilégio ter a chance de conhecer e poder sentir a Amazônia das mais diversas formas é pouco, diante de todo o aprendizado e crescimento que esse bioma mágico me proporcionou. Colocando na minha trajetória acadêmica pessoas especiais desde o primeiro dia que pisei nessas terras e que hoje considero grandes amigos.

Começo meus agradecimentos pelo primeiro grupo que fez germinar a semente desafiadora da pesquisa, aos amigos do Mamirauá, sou imensamente grata pela acolhida e primeiros passos na pesquisa. Foi nessa casa que tive as primeiras percepções do quão desafiador e grandioso é fazer pesquisa na Amazônia.

Ao grupo de pesquisa do Catalão, por toda dedicação e comprometimento na tomada e construção do banco de dados que tornou esse e tantos outros trabalhos possíveis. Pelas expedições de campo e incontáveis horas na bancada, triando e discutindo pesquisa. Foram tantas mãos e mentes brilhantes que contribuíram e contribuem até hoje com esse grupo que não me arriscaria a citar nomes, por receio de esquecer alguém. A todos vocês muito obrigada!!!

A Sid e Cris, minhas orientadoras e amigas. Obrigada pela acolhida, carinho, dedicação por confiarem a mim esse trabalho tão desafiador. Por me ensinarem a enxergar fora da caixinha, desenvolver meu pensamento crítico e analítico. Hoje depois da tese concluída posso confessar que por diversos momentos não acreditava ser capaz de chegar até aqui.

Ao Dr. Henrique Giacominni, pela simplicidade, acessibilidade, generosidade e paciência na transmissão do conhecimento. Imprescindível na elaboração e entendimento dos modelos de espectro de tamanho.

Gabi, meu parceiro nessa empreitada, sou imensamente grata pelas horas dedicadas às minhas análises, estudos, estruturação dos modelos e reuniões, sem você essa tese não teria sido concluída. Além disso, sou grata pelos meses de companhia durante a Pandemia, foi extremamente importante ter você em casa Gabi, os dias de confinamento ficaram menos e menos perturbadores. Obrigada pela amizade, carinho, escuta e conselhos.

As Bonitas Thathyla e Marina, pela amizade. Momentos divertidíssimos nas nossas tardes de beleza em Maceió, caminhadas pelo centro e bate palma, café na Cats (quanta saudades). Mamá, meu agradecimento especial a você por partilhar comigo a vida em BH neste último ano, pela companhia, carinho, amizade, pelas incontáveis horas de conversas, regadas a cafés e cervejinhas, por te aceitado essa louca proposta para adentrar o mundo insano da consultoria ambiental.

Camila Anjos, minha querida marida!!! Difícil encontrar palavras para descrever a gratidão que sinto em ter você como amiga. Você é uma mulher incrivelmente generosa, obrigada pela companhia e paciência nos últimos anos de Manaus, por tornar leves os dias insanos em que por diversas vezes pensei não ser capaz de compreender o que estava fazendo, pelas horas a fio dedicadas à explicação das bases das teorias ecológicas, com exemplos quase infantis para facilitar o meu entendimento. Por não surtar com minha ansiedade, organização e por dividir dias incríveis.

Não poderia deixar de agradecer a todos os amigos da Salinha, (Sérgio, Mandrake, Gabi, Euri, Thathyla, Danilim, Akemi, Camila, Léo, IoIô, Barbara...) pela amizade, cafés regados a muita conversa jogada fora. Algumas enriquecedoras outras nem tanto, mas tão importantes quanto. Por trazer frescor e leveza nos diversos momentos de desespero.

Aos novos amigos que fiz nesses últimos anos em BH, que acompanharam de perto a conclusão desse trabalho obrigada pelo incentivo e torcida Felipim, Pedro, Sarinha, Fê, Gustavo, Alessandro, Luli....

Quero agradecer especialmente a minha família, meus pais Paulo, Meyber e meu irmão Rapha. Pelo apoio, confiança, incentivo por acreditarem nos meus sonhos mesmo muitas vezes sem compreendê-los, por serem sempre amor, afago e calma.

RESUMO

O tamanho corpóreo da assembleia de peixes de um lago de várzea na Amazônia foi estudado utilizando sob duas perspectivas, uma a partir do tamanho máximo dos indivíduos através de modelos lineares simples e mistos, e outra utilizando modelos de espectro de tamanho proposto por Sheldon e colaboradores (1972). Em ambas a análise testou o efeito de diferentes variáveis sobre os dois atributos. Para tal utilizamos uma série histórica de 20 anos com coletas mensais, analisamos a relação do tamanho em função da categoria trófica, pressão da pesca de subsistência, vagilidade e eventos hidroclimáticos que vêm ocorrendo com maior frequência desde 2005. Amparados por teorias já consolidadas, como a teoria trófica e metabólica, presumimos que existiria uma relação positiva entre o comprimento médio dos peixes e as categorias tróficas analisadas, uma relação negativa entre a pressão de pesca e o tamanho dos peixes, e uma relação negativa entre tamanho e o aumento da frequência e intensidade eventos hidroclimáticos de secas. Contrariando nossas expectativas a pesca não contribuiu para a redução do tamanho dos peixes, contudo isso foi observado em relação aos eventos hidroclimáticos ocorridos com maior frequência nos últimos anos. Além disso, esperávamos que as secas extremas que ocorreram nos últimos anos tivessem uma relação negativa significativa com o espectro de tamanho da assembleia, o que não foi observado. Esse resultado levou-nos a inferir que possivelmente, para a assembleia de peixes do lago estudado, a alteração na dinâmica das secas não seja um fator protagonista nas mudanças do espectro de tamanho relatadas em outros trabalhos, embora esteja agindo sobre o tamanho máximo dos indivíduos de muitas espécies. Acreditamos que outras variáveis como área e profundidade do lago associada a informações de desembarque, provavelmente atuem de forma mais expciva sobre o espectro de tamanho dos peixes.

Palavras-chave: tamanho do corpo, espectro de tamanho, eventos hidroclimáticos, efeitos da pesca, assembleia de peixes amazônicos

ABSTRACT

The body size of a fish community in an Amazonian floodplain lake was studied using mixed linear models and size spectrum models proposed by Sheldon et al. (1972). For this, we used a historical series of 20 years of monthly collections, analyzed the size relationship according to the trophic category, subsistence fishing pressure, vagility and hydroclimatic events that have been occurring with greater frequency since 2005. Supported by already consolidated theories, such as the theory trophic and metabolic, we presumed that there would be a positive relationship between the mean length of the fish and the trophic categories analyzed, a negative relationship between fishing pressure and size, and a negative relationship between size and hydroclimatic events. Contrary to our expectations, fishing did not contribute to the reduction in fish size, however hydroclimatic events that occurred more frequently in recent years were correlated to reduction in fish size. Furthermore, we tested if the extreme droughts that occurred in recent years had a significant negative relationship with the community size spectrum, which did not occur. This result leads us to infer that possibly, for the fish community of this specific lake, the change in the dynamics of droughts is not a leading factor in the changes in the size spectrum as reported in other studies, although it has reduced the maximum size of many fish species.

Keywords: body size, size spectrum, hydroclimatic events and amazonian fish community

Sumário

AGRADECIMENTOS	4
Resumo	6
ABSTRACT	7
Introdução geral	12
Variação climática na Amazônia e seus efeitos nos ecossistemas aquáticos	12
Importância do tamanho dos organismos na natureza	14
Espectro de tamanho em comunidades biológicas - um breve histórico.....	16
Referências	19
Capítulo I	25
Length-weight relationship of fish species from Central Amazon floodplain	25
Abstract:	25
Reference.....	29
Capítulo II	31
FATORES HIDRO CLIMÁTICOS E TRÓFICOS QUE REGULAM O TAMANHO MÁXIMO DAS ESPÉCIES NA ASSEMBLEIA DE PEIXES DE UM LAGO DE VÁRZEA	31
Resumo:.....	31
Abstract:	31
Introdução	32
Material e Métodos	34
Área de estudo.....	34
Amostragem dos peixes	34
Anomalias hidroclimáticas - severidade do período de águas baixas	35
Seleção das espécies, definição do nível trófico, classificação de vagilidade e pressão por pesca.....	36
Análise de dados	39

Resultados	39
Discussão.....	43
Referências	47
Capítulo III	50
Existe variação no Espectro de tamanho de peixes sob influencia de secas extremas em um lago da várzea amazônica.	50
Resumo.....	50
Abstract:	50
Material e Métodos	54
Área de estudos	54
Dados hidrológicos.....	54
Amostragem dos peixes	55
Análise do espectro de tamanho.....	55
Resultados	57
Discussão.....	61
Referências.....	66
SINTESE.....	73
ANEXO I –.....	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Classificação das onze espécies selecionadas para análise da variação das médias do tamanho máximo quanto à categoria de pesca, classificação trófica e vagilidade.....	38
Tabela 2 Resultados do LMM - para testar o efeito das anomalias de seca sobre a média dos tamanhos máximos em relação a vagilidade, nível trófico e categoria de pesca sobre a assembleia de onze espécies de maior ocorrência na comunidade de peixes do Lago Catalão – Manaus – AM.	40
Tabela 3 Resultados dos modelos lineares mistos – LMM para testar o efeito das anomalias de seca sobre a média dos tamanhos máximos em relação a vagilidade, nível trófico e categoria de pesca das onze espécies de maior ocorrência na comunidade de peixes do Lago Catalão – Manaus – AM	42
Tabela 4 Matriz de autocorrelação cruzada entre as variáveis, considerando de zero a três anos de tempos de retardo no efeito entre variáveis. PMC- ponto médio da classe; severidade - valor mínimo de nível da água; Duração - número de dias de seca fluvial	57
Tabela 5 Resultados do modelo – LMM para testar o efeito da duração e intensidade da seca sobre o SS de abundância da comunidade de peixes do lago Catalão.	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Série histórica das anomalias climáticas para o número de dias de seca fluvial – Lago Catalão, Manaus – Amazonas. Valores positivos indicam secas mais longas que a média e quanto maior o valor mais longa foi a seca em relação à média histórica, valores negativos indicam secas mais curtas que a média. Esses valores podem ser interpretados como dias a mais ou dias a menos em relação à média histórica.....	36
Figura 2 Representação gráfica dos resultados do modelo linear mistos, para a relação entre as médias do tamanho máximo da assembleia de peixes (11 espécies) e o nível trófico série temporal (1999- 2019). Os pontos em vermelho indicam a média.	41
Figura 3 - Representação gráfica dos resultados do modelo linear mistos, relação entre as médias do tamanho máximo da assembleia de peixes (11 espécies) e anomalias hidroclimáticas do período de águas baixas (1999- 2019). Os pontos em vermelho indicam a média.	43

Catálogo na Publicação (CIP-Brasil)

Z94v Zuchi, Nágila Alexandre
Variação do tamanho na assembleia de peixes em um lago de várzea na
Amazônia Central. / Nágila Alexandre Zuchi; orientadora: Sidinéia A.
Amadio; coorientador Cristhiana Paula Röpke. - Manaus: [s. 1.], 2023.

185 KB

79 p. : il. color.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Biologia de Água
Doce e Pesca Interior – PPG-BADPI) - Coordenação do Programa de
Pós-Graduação, INPA, 2023.

1. Peixes. 2. Assembleia de peixes. I. Amadio, Sidinéia A. II. Röpke,
Cristhiana Paula . III. Título

CDD 597.811 3

INTRODUÇÃO GERAL

Variação climática na Amazônia e seus efeitos nos ecossistemas aquáticos

Sustentada por intensas precipitações sazonais e temperaturas constantes, a Amazônia vem sendo afetada pelas mudanças que têm ocorrido no clima. Essas alterações têm contribuído de forma significativa para modificações em um importante sistema aquático amazônico, as planícies de inundação (várzeas), influenciando a hidrologia, alterando a sincronicidade do pulso de inundação e conseqüentemente toda a dinâmica desse importante ambiente (Junk, 1989; Junk et al., 2007; Renó et al., 2011, Marengo et al., 2011, Satyamurty et al., 2013, Gloor et al., 2013).

O regime de precipitação na Amazônia não ocorre de forma homogênea na paisagem, ou seja, existem diferenças expressivas entre as localidades, e essas diferenças estão relacionadas a fatores espaço/temporais distintos e a sistemas atmosféricos. Além disso, a precipitação é fortemente correlacionada com a interação oceano-atmosfera, a qual vem sofrendo alterações importantes no seu padrão relacionada aos eventos de *El Niño* e *La Niña* (Madden; Julian, 1994; Philander, 1990; Ropelewski; Halpert, 1992).

Cada vez mais estudos relacionam as alterações climáticas anormais aos eventos de *El Niño* e *La Niña* (*El Niño* Southern Oscillation-ENSO). Eventos ENSO são reconhecidamente um fenômeno climático de grande escala, que pode levar a diversas alterações meteorológicas, sendo caracterizado por fases de aquecimento (*El Niño*) e resfriamento (*La Niña*) em relação à temperatura superficial do oceano Pacífico (Sea Surface Temperature - SST; Philander, 1983; Trenberth, 1997). Agindo de forma diversa e antagônica em diferentes regiões, esses fenômenos afetam todos os tipos de ambientes, desde os marinhos até ecossistemas continentais (Caviedes, 2001; Garcia et al., 2004, Collins et al., 2010; Su et al., 2018; Pereira et al., 2020).

Dentre os efeitos observados em ambientes aquáticos continentais, destacam-se alterações no ciclo hidrológico global, atuando nos padrões de precipitação, que resultam em eventos de secas e cheias em diferentes partes do mundo (Ropelewski & Halpert, 1987; Philander, 1990; Grimm & Tedeschi, 2008; Henderson et al., 2018). Mudanças

decorrentes de eventos ENSO, relacionados à frequência de inundações, eventos de seca extremas, qualidade da água, descarga e fluxo dos rios, foram demonstrados em diferentes bacias hidrográficas (Chiew et al., 1998; Keener et al., 2010; Su et al., 2018).

Cox et al. (2009) observaram que o gradiente Norte-Sul de temperatura no Atlântico está significativamente correlacionado com as chuvas na porção Sudoeste da Amazônia e, tanto o gradiente no Atlântico como a seca no sudoeste da Amazônia chegaram até níveis extremos. Tal fato se deu por que o resfriamento do Atlântico Sul e o aquecimento do Atlântico Norte fizeram com que os teores de umidades do ar aumentassem e, desta forma, condensassem e caíssem como chuva, e depois, quando o ar desce ao nível do solo, é seco, e resseca a área atingida (Fearnside, 2009).

Então desta forma sabemos que para a bacia Amazônica especificamente os eventos de seca extrema em geral estão associados ao El Niño juntamente com aquecimento do Atlântico Tropical Norte, sendo este sentido de forma mais pronunciada na parte central e norte da bacia. Isto ocorre porque o ENSO é capaz de modificar as fases de seca e cheia do regime de inundação, por meio de mudanças na pluviosidade e descarga fluvial na escala da bacia, afetando de modo diferente as porções norte, noroeste e sul da bacia Amazônica (Swales et al., 1999; Schongart & Junk, 2007).

A sazonalidade do pulso de inundação na Amazônia é a principal força reguladora da várzea (Junk et al., 1989). Eventos de cheia aumentam a conexão entre diferentes ambientes tornando-os mais homogêneos, tanto em características abióticas quanto bióticas, enquanto nos períodos de seca os ambientes são mais heterogêneos devido ao isolamento entre as diferentes paisagens aquáticas, o que acarreta em comunidades distintas, ditadas por fatores locais (Ward & Stanford, 1995; Tockner et al., 2000; Agostinho et al., 2004^a e Thomaz et al., 2007). Dada a importância do pulso de inundação, Baumgartner et al. (2018) e Wang et al. (2019), destacam que mudanças na sua dinâmica relacionadas a eventos de seca que se estendem para além do período regular acarretariam a redução ou ausência de áreas alagadas.

Correia et al. (2022) vão além, demonstrando toda a diversidade e complexidade de interações que ocorrem no ambiente de várzea, moduladas pela sincronidade do pulso de inundação. Os autores apresentam diversos cenários envolvendo respostas dos organismos a alterações ocorridas nos ambientes de várzea em função de diversas ações antrópicas diretas, como o desmatamento, e indiretas, como as anomalias climáticas.

Destacam, por exemplo, como as adaptações de plantas que colonizam a várzea podem ser afetadas (Lytle e Poff 2004) pela modificação na sincronicidade do pulso de inundação (períodos de seca mais curtos e intensos e/ou secas mais longas e fracas), uma vez que frutificação e dispersão de sementes, no ambiente florestal da várzea, estão adaptadas à sincronicidade do pulso (Haugaasen e Peres 2005a, Hawes e Peres 2016).

Tais mudanças afetam tanto a fauna terrestre quanto a aquática frugívora, uma vez que a redução e/ou atraso ou diminuição na disponibilidade do recurso alimentar acarreta interferências diretas na demanda energética. Além disso, alteram a diversidade funcional da assembleia de peixes e também modificam as funções ecossistêmicas, uma vez que peixes com determinados atributos ecológicos e estratégias de história de vida em suas diferentes fases seriam afetados. Como exemplo, peixes piscívoros e carnívoros que em períodos secos são favorecidos pela grande disponibilidade de alimento, uma vez que a redução da área alagada faz com que essas espécies fiquem confinadas em áreas reduzidas, seriam amplamente favorecidos pela maior oferta de presas (Moutinho, 2022). Em contrapartida, a cheia fornece mais recursos para peixes que se alimentam de materiais alóctones, como detritívoros, e onívoros com tendência a herbívora, já que a inundação da vegetação terrestre proporciona maior disponibilidade de recursos (Resende, 2000; Smolders et al., 2000). Além disso, cheias extremas causadas por ENSO podem favorecer populações de peixes migradores, proporcionando mais áreas de berçário, maior conectividade e fluxo de água intenso (Oliveira et al., 2015 e Camacho Gerreiro et al., 2021)

Mediante a refinada sincronia existente entre a assembleia de peixes e o ciclo hidrológico, alguns estudos têm buscado encontrar padrões frente às mudanças climáticas (Gillanders et al., 2011; Ruaro et al., 2019), mas esse conhecimento em ambientes amazônicos ainda é incipiente.

Importância do tamanho dos organismos na natureza

O tamanho corporal, uma das características mais evidentes dos seres vivos, é também um importante atributo da história de vida das espécies, além de estar intimamente relacionado a variáveis ecológicas importantes como distribuição geográfica, densidade populacional, biomassa, estratégia de vida, dispersão, competição e predação (La Barbera 1989; Brown 1995; Hart & Bychek, 2011; Havens et al., 2015). Ele é fundamental para explicar a regularidade e estabilidade das teias alimentares, (Warren e Lawton, 1987;

Cohen et al. 1993; DeLong JP et al.,2021; Neutel et al. 2002), uma vez que empiricamente os predadores tendem a ser maiores que suas presas (Warren e Lawton, 1987; Cohen et al., 1993; Memmott et al., 2000; DeLong et al., 2022)

A estrutura de tamanho corpóreo reflete ainda a quantidade de níveis que uma cadeia alimentar pode ter. Por exemplo, um ecossistema sustentado por espécies de pequeno porte como em lagos, tende a ter mais níveis tróficos na cadeia alimentar; em contrapartida, ecossistemas sustentados por organismos maiores, como nas calhas dos rios, tendem a ter menos elos na cadeia (Stibor et al. 2004, Briand e Cohen 1987, Spencer e Warren 1996, Post 2002). As necessidades metabólicas são reconhecidamente determinadas pelo tamanho do indivíduo (Berlow et al., 2009). Seres vivos de grande porte podem ser forçados a se alimentarem em níveis basais da cadeia alimentar (pequenas presas caracterizadas como consumidores primários ou secundários) para que o equilíbrio trófico seja mantido, uma vez que no topo da cadeia a energia disponível é inferior à demanda metabólica associada aos grandes tamanhos (Arim et al, 2007; Segura et al, 2015; Dantas et al, 2019). Já a limitação para tamanhos reduzidos está relacionada à capacidade de consumir presas grandes (Keppeler et al, 2020).

O tamanho corpóreo reflete, ainda, atributos fisiológicos, como a taxa de crescimento individual, a reprodução e o uso e alocação de energia, intervindo na abundância de indivíduos dentro de uma população (Peters, 1983; Havens, 1998; Audzijonyte et al. 2013, Clarke,2017). Ainda, existe uma estreita relação com a regulação da temperatura corporal: um animal com volume corporal maior é mais eficiente em manter determinada temperatura do seu corpo do que um animal pequeno (James ,1970).

Além disso, para algumas características-chave comportamentais das espécies como a migração, por exemplo, o tamanho do corpo é considerado um fator importante que molda a capacidade dos indivíduos de dispersar. A relação positiva entre tamanho e capacidade de dispersão pode facilmente ser explicada, uma vez que espécies maiores têm uma maior capacidade adaptativa (Avaria-Llautureo et al, 2021). Pensando em ambientes amazônicos, temos o exemplo de três grandes bagres da família Pimelodidae (*Brachyplatystoma platynemum*, *B. rousseauxii* e *B. vaillantii*) que percorrem mais de 3.000 km entre o estuário, na desembocadura do rio Amazonas com o oceano Atlântico e as cabeceiras, nas fronteiras peruana e colombiana (Barthem Goulding, 1997). É possível que além de influenciar a capacidade de dispersão, o tamanho também desempenhe um papel importante no estabelecimento das espécies no novo local, já que os indivíduos que

realizam os deslocamentos e chegam em novos habitats terão que competir por espaço e recurso alimentar, estando propensos à competição e pressão de predação (McCauley & Mabr 2011).

Fatores antrópicos também são fortes modeladores do tamanho dos seres vivos, e alterações climáticas como o aumento de temperatura tem uma relação negativa com o tamanho. Lindmark et al. (2022) afirmam que a temperatura ótima para o crescimento dos seres vivos reduz à medida que o tamanho do corpo aumenta. Partindo dessa premissa, não seria arbitrário afirmar que os indivíduos maiores serão os primeiros a serem atingidos pelo aumento da temperatura do planeta em decorrência do aquecimento global em curso. Em resposta à pressão de caça e desaparecimento e ou fragmentação de habitats, Olden et al. (2007) e Ripple et al. (2017) acreditam que o risco de extinção também está relacionado ao tamanho do corpo do indivíduo, uma vez que indivíduos de grande porte são alvo constante da caça e pesca, enquanto os organismos menores são diretamente afetados pelo desaparecimento de habitats. Desta forma o tamanho é afetado de forma direta e indireta por estressores antrópicos. Nesse sentido, as alterações impostas pelo homem sejam elas diretas (caça e pesca) ou indiretas (como o aumento da temperatura global), é esperada maior abundância de organismos com menor tamanho, que utilizam melhor o espaço e os recursos alimentares (Brown, 1995; Brown et al., 2004). Claramente o tamanho é um importante atributo da história de vida dos seres vivos e pode ser um descritor chave para prever os efeitos de alterações em processos ambientais.

Espectro de tamanho em comunidades biológicas - um breve histórico

A discussão acerca da relação entre abundância e tamanho dos organismos é feita desde que a Ecologia surgiu como uma disciplina formal (Sprules et al.2015). Em 1927, Elton afirmou que o tamanho do organismo tem uma influência extraordinariamente grande na organização das comunidades animais. Para descrever esse fato ele introduziu a “pirâmide de números”, onde descreve a existência da relação inversa entre abundância de organismos e seu tamanho. Indubitavelmente essa afirmativa tem mantido notável ressonância em toda a literatura ecológica, mostrando a importância do tamanho do corpo como um mecanismo estrutural no âmbito das comunidades.

O estudo pioneiro sobre espectro de tamanho realizado por Sheldon et al. (1972) mostra regularidades marcantes na distribuição de biomassa. Entre os vários padrões observados, está a relação inversa entre abundância e tamanho, que muito se assemelha à pirâmide de

números proposta por Elton em 1927. Desde então, vários estudos estabeleceram as bases necessárias para o desenvolvimento de uma teoria quantitativa de espectro de tamanho em organismos aquáticos.

Um método alternativo para apresentar espectros de biomassa foi proposto por Platt e Denman (1978), denominado “espectro de biomassa normalizado”, estimado a partir da densidade de biomassa em função do intervalo de tamanho. Essa é a forma mais comum de calcular espectro de tamanho entre organismos aquáticos na literatura e é sempre apresentada como um gráfico logarítmico duplo, mostrando tipicamente uma tendência aproximadamente linear que diminui a biomassa normalizada à medida que o tamanho dos indivíduos aumenta. Tanto o modelo proposto por Sheldon (1972) quanto o proposto por Platt e Denman (1978) são descritos com base em métodos de categorização em que as medidas de massa corporal são agrupadas em intervalos de tamanho linear ou logarítmico. Mais tarde, Dickie et al. (1987) e Boudreau e Dickie (1989) sugeriram o uso dos modelos de espectro de biomassa como um método alternativo para estudar o fluxo de energia.

A partir de então os modelos de espectro de tamanho e de biomassa ofereceram um ponto de partida consistente para desenvolver teorias sobre o funcionamento dos ecossistemas aquáticos, normalmente apresentados em nível de comunidade. Tais modelos podem explicar o *trade-off* entre reprodução, crescimento e desenvolvimento que os indivíduos enfrentam quando os recursos são limitados, por exemplo (Griet et al., 2016). Ainda segundo esses autores, ao contrário dos modelos baseados em espécies, os modelos de espectro de tamanho desconsideram as diferenças metabólicas e fisiológicas dos indivíduos com o mesmo tamanho. Desta forma, esses modelos funcionam como um bom descritor para as características de estruturação de ambientes aquáticos baseado em tamanho, desconsiderando, portanto, o papel da diversidade taxonômica das espécies que os compõem, permitindo desta forma, observar uma regularidade no espectro de biomassa em grandes escalas espaciais e temporais. A princípio, esses modelos não foram desenvolvidos para lidar com dinâmicas específicas de espécies, embora tenham sido usados algumas vezes para fornecer informações do ambiente no qual as espécies-alvo evoluíram (Maury, 2010).

A característica comum de todas essas teorias apresentadas até aqui é que elas são base nos processos fisiológicos e ecológicos que são frequentemente observados por nós na natureza, como por exemplo a relação presa-predador, transferência energética entre

níveis tróficos, dentre outras. Muitas das teorias previam um espectro linear normalizado de biomassa com declive negativo. Os estudos mencionados acima estabeleceram os fundamentos da abordagem do espectro de massa para o estudo das comunidades aquáticas. O que se seguiu foi um esforço conjunto para caracterizar espectros de biomassa de muitas comunidades aquáticas. Esses estudos demonstraram as amplas semelhanças, bem como a variabilidade na estrutura de tamanho das comunidades em todo o mundo e formaram a base para o desenvolvimento das teorias do espectro de biomassa.

Esta tese é composta por três capítulos em forma de artigo. O Capítulo I apresenta análise de relação peso - comprimento das espécies comerciais e não comerciais mais abundantes no Lago Catalão. O Capítulo II apresenta análise das médias do tamanho máximo de 11 espécies, provenientes de um lago de várzea da Amazônia central. Através de modelos lineares, são relacionadas as possíveis variações do tamanho da assembleia a anomalias hidroclimáticas, nível trófico, vagilidade e categoria de uso pela pesca. O Capítulo III aplica a Teoria de espectro de tamanho proposta por Sheldon (1972) para avaliar os possíveis efeitos da intensidade das secas sobre o espectro de tamanho da comunidade de peixes do lago de várzea da Ponta do Catalão.

REFERÊNCIAS

- Andrade, B. S.; Singh, C. L.; Santos, J. A.; Gonçalves, V. V. C.; Siqueira-Souza, F. K.; Freitas, C. E. C.(2018) Efeitos das mudanças climáticas sobre as comunidades de peixes na Bacia Amazônica. *Revista Ciências da Sociedade*, v. 2, n. 4) p. 107-124.
- Arim, M. et al. (2007). On the relationship between productivity and food chain length at different ecological levels. - *Am. Nat.* 169: 62-72.
- Audzijonyte, A., Kuparinen, A., Gorton, R. & Fulton, E. A. (2013). Ecological consequences of body size decline in harvested fish species: positive feedback loops in trophic interactions amplify human impact. *Biol. Lett.* 9, 20121103
- Avaria-Llautureo, J., Venditti, C., Rivadeneira, M.M. et al. (2021) Historical warming consistently decreased size, dispersal and speciation rate of fish. *Nat. Clim. Chang.* 11, 787–793.<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01123-5>
- Barros, D. F.; Albernaz, A. L. M.(2013) Possible impacts of climate change on wetlands and its biota in the Brazilian Amazon. *Brazilian Journal of Biology*, v. 74, n. 4, p. 810-820.
- Barthem, R.B. e Goulding, M. (1997) *The Catfish Connection: Ecology, Migration, and Conservation of Amazon Predators*. New York, Columbia University Press. 144p.
- Berlow, E.L., Dunne, J.A., Martinez, N.D., Stark, P.B., Williams, R.J. & Brose, U. (2009). Simple prediction of interaction strengths in complex food webs. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 106, 187–191.
- Boudreau, P.R., Dickie, L.M., (1992). Biomass spectra of aquatic ecosystems in relation to fisheries yield. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49, 1528–1538. <https://doi.org/10.1139/f92-169>.
- Briand, F. and Cohen, J. E. (1987). Environmental correlates of food chain length. - *Science* 238: 956-960.
- Brown, J.H (1995) *Macroecology*. Chicago: Univ. Chicago Press La Barbera, M. (1989) Analyzing body size as a factor in ecology and Evolution. *Ann. Rev. Ecol. Syst* 20:97-117
- Campos, D. F.; Val, A. L.; Almeida-Val, V. M. F.(2018) The influence of lifestyle and swimming behavior on metabolic rate and thermal tolerance of twelve Amazon forest stream fish species. *Journal of Thermal Biology*, v. 72, p. 148-154.

- Cheung, W. W. L.; Lam, V. W.; Sarmiento, J. L.; Kearney, K.; Watson, R. E. G.; Zeller, D.; Pauly, D. (2010) Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global Change Biology*, v. 16, n. 1, p. 24-35.
- Cheung, W. W. L.; Lam, V. W.; Sarmiento, J. L.; Kearney, K.; Watson, R. E. G.; Zeller, D.; Pauly, D. (2010) Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global Change Biology*, v. 16, n. 1, p. 24-35.
- Cisneros-Mata, M. A.; Mangin, T.; Bone, J.; Rodriguez, L.; Smith, S. L.; Gaines, S. D. (2019) Fisheries governance in the face of climate change: Assessment of policy reform implications for Mexican fisheries. *PloS One*, v. 14, n. 10, p. e0222317.
- Clark, M., Schaeffli, B., Schymanski, S., Samaniego, L., Luce, C., Jackson, B., ... Ceola, S. (2016). Improving the theoretical underpinnings of process-based hydrologic models. *Water Resources Research*, 52, 2350–2365. <https://doi.org/10.1002/2015WR017910>
- Cohen, J. E., S. L. Pimm, P. Yodzis, and J. Saldaña. (1993). Body sizes of animal predators and animal prey in food webs. *Journal of Animal Ecology* 62:67–78.
- Dantas DDF, Caliman A, Guariento RD, Angelini R, Carneiro LS, Lima SMQ, Martinez PA, Attayde JL (2019) Climate effects on fish body size-trophic position relationship depend on ecosystem type. *Ecography* 42:1579–1586. <https://doi.org/10.1111/ecog.04307>
- DeLong JP (2021) *Predator ecology: the evolutionary ecology of the functional response*. Oxford University Press.
- DeLong, J.P., Uiterwaal, S.F. (2022) Predator functional responses and the biocontrol of aphids and mites. *BioControl* 67, 161–172 <https://doi.org/10.1007/s10526-021-10127-1>
- Dickie, L.M., Kerr, S.R., Boudreau, P.R., (1987). Size-dependent processes underlying regularities in ecosystem structure. *Ecol. Monogr.* 57 (3), 233–250.
- Elton, C. (1927). *Animal Ecology*. - Sidgwick and Jackson, London.
- Free, C. M.; Thorson, J. T.; Pinsky, M. L.; Oken, K. L.; Wiedenmann, J.; Jensen, O. P. (2019) Impacts of historical warming on marine fisheries production. *Science*, v. 363, n. 6430, p. 979-983.
- Freitas, C. E. C.; Rivas, A. A.; Campos, C. P., Sant'ana, I.; Kahn, J. R.; Correa, M. A. A.; Catarino, M. F. (2013). The potential impacts of global climatic changes and dams

- on Amazonian fish and their fisheries. In: TURKER, H. (Ed.). *New advances and contributions to fish biology*. London: IntechOpen, p. 175-195.
- Gaines, S. D.; Costello, C.; Owashi, B.; Mangin, T.; Bone, J.; Molinos, J. G.; Burden, M.; Dennis, H.; Halpern, B. S.; Kappel, C. V.; Kleisner, K. M.; Ovando, D.(2018) Improved fisheries management could offset many negative effects of climate change. *Science Advances*, v. 4, n. 8, p. eaao1378.
- Guiet J, Aumont O, Poggiale J-C, Maury O (2016) Effects of lower trophic level biomass and water temperature on fish communities: a modelling study. *Prog Oceanogr* 146: 22–37.
- Hart, R. C. & E. A. Bychek, (2011). Body size in freshwater planktonic crustaceans: an overview of extrinsic determinants and modifying influences of biotic interactions. *Hydrobiologia* 668: 61–108.
- Hutchinson, G. E. (1959). Homage to Santa Rosalia or why are there so many kinds of animals? - *Am. Nat.* 93: 145- 159.
- James, F. C. (1970). Geographic size variation in birds and its relationship to climate. *Ecology*, 51(3), 365–390. <https://doi.org/10.2307/1935374>
- Jeppesen, E.; Meerhoff, M.; Davidson, T. A.; Trolle, D.; Sondergaard, M.; Lauridsen, T. L.; Beklioglu, M.; Brucet, S.; Volta, P.; González-Bergonzoni, I.; Nielsen, A.(2014) Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. *Journal of Limnology*, v. 73, p. 84-107.
- Junk, W. J.; Mota Soares, M. G.; Bayley, P.B. (2007) Freshwater fishes of the Amazon River basin: their biodiversity, fisheries, and habitats. *Aquat Ecosyst Heal Manag* 10(2):153–173. doi:10.1080/14634980701351023
- Junk, W., Bayley, P.B.; Sparks, R.E. (1989) The flood pulse concept in river-floodplain systems. Pages 110-127 in D.P. Dodge, ed. *Proceedings of the International Large River Symposium (LARS)*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 106.
- Keppeler FW, Montaña CG, Winemiller KO (2020) The relationship between trophic level and body size in fishes depends on functional traits. *Ecol Monogr* 00:e01415. <https://doi.org/10.1002/ecm.1415>
- Keppeler FW, Winemiller KO (2020) Can ancestry and morphology be used as surrogates for species niche relationships? *Ecol Evol* 10:6562–6578. <https://doi.org/10.1002/ece3.6390>

- Keppeler, F.W., Montaña, C.G. & Winemiller, K.O. (2020). The relationship between trophic level and body size in fishes depends on functional traits. *Ecol. Monogr.*, 0, 1–19.
- La Barbera, M. (1989) Analyzing body size as factor in ecology na Evolution. *Ann. Rev. Ecol. Syst* 20:97-117
- Lindmark, M., Ohlberger, J., & Gårdmark, A. (2022). Optimum growth temperature declines with body size within fish species. *Global Change Biology*, 28, 2259–2271.
- Madden R.A.; Julian, P.R. (1994) Observations of the 40- 50 day tropical oscillation - review. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 814-837.
- Marengo, J. A.; Tomasella, J.; Alves L. M.; Soares W. R.; Rodriguez D. A. (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.*. 38. L12703. doi: 10.1029/2011GL047436.
- McCann KS (2011) *Food webs*. Princeton University Press, New Jersey
- Memmott J, Martinez ND, Cohen JE (2000) Predators, parasitoids and pathogens: species richness, trophic generality and body sizes in a natural food web. *J Anim Ecol* 69:1–15
- Neutel, A.M., Heesterbeek, J.A.P. & de Ruiter, P.C. (2002). Stability in real food webs: weak links in long loops. *Science*, 296, 1120– 1123.
- Ojea, E.; Pearlman, I.; Gaines, S. D.; Lester, S. E (2017). Fisheries regulatory regimes and resilience to climate change. *Ambio*, v. 46, n. 4, p. 399-412.
- Olden, J. D., Hogan, Z. S. & Zanden, M. (2007). Small fish, big fish, red fish, blue fish: size-biased extinction risk of the world’s freshwater and marine fishes. *Global Ecol Biogeogr.* 16:694-701.
- Oremus, K. L.; Bone, J.; Costello, C.; Molinos, J. G.; Lee, A.(2020). Mangin, T.; Salzman, J. Governance challenges for tropical nations losing fish species due to climate change. *Nature Sustainability*, v. 3, n. 4, p. 277-280.
- Peters, R. (1983). *The Ecological Implications of Body Size*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Philander, S.G. (1990). *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. San Diego, California: Academic press, INC.
- Platt T, Denman K (1977) Organisation in the pelagic ecosystem. *Helgolander Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 30, 575–581.

- Platt, T., Denman, K., (1978). The structure of pelagic marine ecosystems. *Rapp. P.-V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer* 173, 60–65.
- Post, D. M. (2002). The long and short of food-chain length. - *Trends Ecol. Evol.* 17: 269-277.
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Hoffmann, M., Wirsing, A. J., & McCauley, D. J. (2017). Extinction risk is most acute for the world's largest and smallest vertebrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, 10678–10683
- Ropelewski, C. F.; Halpert, M. S. (1992). Surface temperature patterns associated with the southern oscillation. Washington, D.C.: Climate Analysis Center.
- Röpke, C. P. et al. (2017). Simultaneous abrupt shifts in hydrology and fish assemblage structure in a floodplain lake in the central Amazon. *Scientific Reports*, v. 7, n. 40170, p. 1-10.
- Satyamurty, P.; Da Costa, C. P. W.; Manzi, A. O.; Candido, L. A. (2013). A quick look at the 2012 record flood in the Amazon Basin, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1396–1401, doi:10.1002/grl.50245
- Segura AM, Franco-Trecu V, Franco-Fraguas P, Arim M (2015). Gape and energy limitation determine a humped relationship between trophic position and body size. *Can J Fish Aquat Sci* 72:198–205. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0093>
- Serpetti, N.; Baudron, A. R.; Burrows, M. T.; Payne, B. L.; Helaouet, P.; Fernandes, P. G.; Heymans, J. J. (2017). Impact of ocean warming on sustainable fisheries management informs the Ecosystem Approach to Fisheries. *Scientific Reports*, v. 7, n. 1, p. 1-15.
- Sheldon RW, Prakash A, Sutcliffe WH (1972). The size distribution of particles in the ocean. *Limnology and Oceanography*, 17, 327–340.
- Sheldon, R. W., Sutcliffe, W. H. and Prakash, A. (1973). 'The Production of Particles in the Surface Waters of the Ocean with Particular Reference to the Sargasso Sea', *Limnology and Oceanography*, 18(5), pp. 719–733. doi: 10.4319/lo.1973.18.5.0719.
- Spencer, M. and Warren, P. H. (1996). The effects of habitat size and productivity on food web structure in small aquatic microcosms. - *Oikos* 75: 419-430.
- Sprules W. G, Barth L. E. (2015). Surfing the biomass size spectrum: Some remarks on history, theory, and application. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 73, 477–495.

- Stibor, H., and others. (2004). Copepods act as a switch between alternative trophic cascades in marine pelagic food webs. *Ecol. Lett.* 7: 321– 328. doi:10.1111/j.1461-0248.2004.00580.x
- Val, A. L.(2019). Fishes of the Amazon: diversity and beyond. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 91, sup. 3.
- Warren, P. H., and J. H. Lawton. (1987). Invertebrate predator-prey body size relationships: An explanation for upper triangular food webs and patterns in food web structure? *Oecologia* 74: 231– 235.

CAPÍTULO I

LENGTH-WEIGHT RELATIONSHIP OF FISH SPECIES FROM CENTRAL AMAZON FLOODPLAIN

Nágila Zuchi¹ | Cristhiana Röpke^{1,2} | Akemi Shibuya² | Thatyla Farago² |

Marina Carmona¹ | Jansen Zuanon^{1,2} | Sidineia Amadio^{1,2}

(Publicado – Maio -2020 – Applied Ichthyology)

ABSTRACT:

Length-weight relationship (LWR) for 39 freshwater fish species captured in the Catalão Lake, a floodplain area at the confluence of the Amazonas and Negro rivers is presented. LWRs were calculated based on fish sampled over 18 years (1999–2017) using a set of ten gill nets with different mesh sizes, monthly immersed in water for 24-hr with 6-hr interval catches. Measurements were done for standard length (SL – 0.1 cm precision) and total weight (TW – 0.01 g precision). The LWRs were calculated by the linear regression of natural log-transformed SL and TW data: $TW = a \times SL^b$. All statistical analyses were performed with R software. From all species considered, 32 are new LWR records for the international literature as well as for the Amazonian ichthyofauna; additional records expand the known size range for seven species.

Key words - Amazon, floodplain, LWR

INTRODUCTION

Length-weight relationship (LWR) is likely the most useful tool to estimate indirect growth, body condition, and to understand the life cycle of fishes (Camara, Caramaschi, & Petry, 2011; Froese, 2006). Length and weight are biometrics data easily taken and available in most datasets from monitoring studies. Despite the simplicity, it provides highly useful information for fisheries management and can be used in different applications like the estimation of biomass from length data or comparisons between growth patterns and morphologic differentiation of the same species from different populations (Imorou, Alphonse, Edmond, & Youssouf, 2019; Karachle & Stergiou, 2012).

The Amazon basin shelters a very highly diverse freshwater fish fauna that occupy a wide variety of environments. The mid- dle stretch of the Amazon River sustains very important fishery activities, which targets about 100 species coming from its main channel and associated floodplain environments (Santos, Ferreira, & Zuanon, 2006). Here we present LWRs for 39 fish species based on 18 years of monthly fish sampling in the Catalão Lake, at the conflu- ence of Amazonas and Negro rivers.

MATERIALS AND METHODS

This study was carried out in the Catalão Lake, a floodplain lake at the confluence of the Amazonas and Negro rivers, Amazonas State, Brazil. Samples were obtained monthly between October 1999 and December 2017, using a set of 10 gill nets with different mesh sizes ranging from 30 to 120 mm, immersed in water for 24-hr with 6-hr interval catches (Röpke, Amadio, Winemiller, & Zuanon, 2016). Each fish specimen was measured for standard length (SL – 0.1 cm precision) and total weight (TW – 0.01 g precision). The fish survey was authorized by IBAMA – Brazilian Institute of the Environment and Renewable Natural Resources (license #101932) and INPA Animal Ethics Committee CEUA (protocol #051/2015)

The LWRs were calculated by the linear regression of natural log-transformed TW and SL data: $TW = a \times SL^b$ (Froese, 2006). The intercept (a), slope (b), the 95% confidence limits for a and b and the coefficient of determination (r^2) were estimated. Before the deter- mination of the coefficients, length-weight plots were conducted for outliers' detection, which were excluded from the analyses (Froese, 2006). Species with specimens' numbers as low as 10 were included if there was a good fit for LWRs ($r^2 \geq .95$). All statistical anal- yses were performed with R software (RDevelopment Core Team; www.r-project.org)

RESULTS

A total of 39 species representing 14 families of six orders are con- sidered in this study. The LWR parameters of the species and the re- lated statistics are shown in Table 1 (attachment 1), presenting the standard length and weight ranges as well as the equation parameters “a” (intercept) and “b” (slope) of the LWR regressions. Despite the high r^2 value ob- tained for *Cichla monoculus* the estimates should be considered with care, once size range is restricted to small fish. The LWR estimates for 11 species, marked with (*)

in Table 1, should be considered as tentative because of the relatively low value (<0.95) for the coefficient of determination despite the careful checks for outliers.

DISCUSSION

This study provides new LWR records for 32 fish species from the Central Amazonian river-floodplain system, which represent an important increase in the scientific information available for fishes from the region (Bevilaqua & Soares, 2010; Dieb-Magalhães, Florentino, & Soares, 2015; Matos et al., 2019; Prestes, Soares, Silva, & Bittencourt, 2010; Sousa, Soares, & Prestes, 2013), as well as for the international literature. From all records presented here, LWR estimates for *Cichla monoculus* and *Pterygoplichthys pardalis* can be found at FishBase, however, we opted to keep these two species in the study because the published record for the first species was based on three specimens only, and for the second, refers to an introduced population in the Philippines (Jumawan & Seroney, 2017), as opposed to our findings that are based on natural populations (Ferraris-Jr, 2007). Our study also considers another seven species which LWR estimates have already been published elsewhere, however, we decided to present the information here because they bring new records on the maximum length, were based on a larger number of specimens and showed better size range: *Heros efasciatus* (Sampaio, Aguiar-Santos, Anjos, Freitas, & Siqueira-Souza, 2019), *Curimatella meyeri* (Matos et al., 2019), *Cichlasoma amazonarum* (Sampaio et al., 2019), *Acestrorhynchus abbreviatus*, *Anadoras grypus*, *Chalceus erythrurus*, and *Pterygoplichthys pardalis* (the four species on Chuctayal, Capitani, Faustino, & Castro, 2017).

Besides the LWR estimates for the 39 species presented here (Table 1), there are three undescribed species with a good size range and distribution that is worth mentioning due to the high degree of certainty that each one of them represents one taxonomic unity (Cella-Ribeiro, Hauser, Nogueira, Doria, & Torrente-Vilara, 2015; Queiroz et al., 2013): *Serrasalmus* sp. n. “2n58” (SL = 5.8–17.5, $r^2 = .98$, $a = 0.014(0.012–0.015)$, $b = 3.342(3.293–3.392)$), *Hemiodus* sp. n. “rabo de fogo” (SL = 2.3–22.7, $r^2 = .96$, $a = 0.018(0.017–0.019)$, $b = 2.925(2.906–2944)$), and *Anodus* sp. (SL = 12.1–24.8, $r^2 = .93$, $a = 0.009(0.006–0.012)$, $b = 3.156(3.043–3.269)$).

The undescribed species *Hemiodus* sp. n. “rabo de fogo” has already been registered by Cella-Ribeiro et al. (2015), however, here we present a wider size range and much lower b value, 2.836, against $b = 3.543$ for the same species from Madeira River. Since fishes

were captured using similar standardized methods in both environments, this result may reflect different environmental characteristics (Cella- Ribeiro et al., 2015), as the two regions (Madeira River and Amazonas floodplain), are physiographically distinct. The LWR estimates for the other two undescribed species *Serrasalmus* sp. n. “2n58” and *Anodus* sp. constitute new records for the scientific literature. Froese's study (2014) provided the estimation of LWR parameters for practically all known fish species available at FishBase using Bayesian analysis, however, as the author pointed out, no specific LWR studies using a set of collected data from natural populations are available for most species, which is provided here.

REFERENCE

- Bevilaqua, D. R., & Soares, M. G. M. (2010). Crescimento e mortalidade de *Pygocentrus nattereri* (Kner, 1985) em lagos de várzea da região de Manacapuru, Amazônia. *Revista Brasileira De Engenharia De Pesca*, 5, 43–52.
- Camara, E. M., Caramaschi, E. P., & Petry, A. C. (2011). Fator de condição: Bases conceituais, aplicações e perspectivas de uso em pesquisas ecológicas com peixes. *Oecologia Australis*, 15, 249–274. <https://doi.org/10.4257/oeco.2011.1502.05>
- Cella-Ribeiro, A., Hauser, M., Nogueira, L. D., Doria, C. R. C., & Torrente-Vilara, G. (2015). Length-weight relationships of fish from Madeira River, Brazilian Amazon, before the construction of hydropower plants. *Journal of Applied Ichthyology*, 31, 939–945. <https://doi.org/10.1111/jai.12819>
- Chuctayal, J., Capitani, L., Faustino, D., & Castro, E. (2017). Length– weight relationships of 23 fish species from floodplain ecosystems of the Andean Amazon piedmont, Peru. *Journal of Applied Ichthyology*, 34, 172–176. <https://doi.org/10.1111/jai.13519>
- Dieb-Magalhães, L., Florentino, A. C., & Soares, M. G. M. (2015). Length– weight relationships and length at first maturity for nine fish species of floodplain lakes in Central Amazon (Amazon Basin, Brazil). *Journal of Applied Ichthyology*, 31, 1182–1184. <https://doi.org/10.1111/jai.12919>
- Ferraris-Jr, C. J. (2007). Checklist of catfishes, recent and fossil (Osteichthyes: Siluriformes), and catalogue of siluriform primary types. *Zootaxa*, 1418, 1–628.
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and length-weight relationships: History, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22, 241–253. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>
- Froese, R., Thorson, J. T., & Reyes, R. B. (2014). A Bayesian approach for estimating length–weight relationship in fishes. *Journal of Applied Ichthyology*, 30, 78–85.
- Imorou, R. S., Alphonse, A., Edmond, S., & Youssouf, A. (2019). Length- weight models and condition factors of fishes from Okpara Stream, Oueme River, Northern-Benin. *International Journal of Forest, Animal and Fisheries Research (IJFAF)*, 3(3), 65–80. <https://doi.org/10.22161/ijfaf.3.3.1>
- Jumawan, J. C., & Seroney, R. A. (2017). Length-weight relationship of fishes in eight floodplain lakes of Agusan marsh, Philippines. *Philippine Journal of Science*, 146(1), 95–99.
- Karachle, P. K., & Stergiou, K. I. (2012). Morphometrics and allometry in fishes. Retrieved from <http://www.intechopen.com/articles/show/title/morphometrics-and-allometry-in-fishes>. ISBN: 978-953-51-0172-7.
- Matos, O. F., Pereira, D. V., Aguiar-Santos, J., Sampaio, A. S., Freitas, C. E. C., & Siqueira-Souza, F. K. (2019). Length-weight relationships of five fish species from

lakes of the Central Amazonian floodplains. *Journal of Applied Ichthyology*, 35, 3. <https://doi.org/10.1111/jai.13901>

Prestes, L., Soares, M. G. M., Silva, F. R., & Bittencourt, M. M. (2010). Dynamic population from *Triportheus albus*, *T. angulatus* and *T. auri-tus* (CHARACIFORMES: CHARACIDAE) in Amazonian Central lakes. *Biota Neotropica*, 10, 3.

Queiroz, L. J., Torrente-Vilara, G., Ohara, W. M., Pires, T., Zuanon, J. A., & Doria, C. R. C. (2013). *Peixes do rio Madeira*, Vol. 1 (p. 1163). São Paulo, Brazil: Editora Diaeto.

Röpke, C. P., Amadio, S. A., Winemiller, K. O., & Zuanon, J. (2016). Seasonal dynamics of the fish assemblage in flood plain lake at the confluence of the Negro and Amazon Rivers. *Journal of Fish Biology*, 89, 194–212. <https://doi.org/10.1111/jfb.12791>

Sampaio, A., Aguiar-Santos, J., Anjos, H., Freitas, C., & Siqueira-Souza, F. (2019). Length-weight relationships of ornamental fish from flood-plain lakes in the Solimões River basin (Iranduba, Amazonas, Brazil). *Revista Colombiana De Ciencia Animal - RECIA*, 11(2), 733. <https://doi.org/10.24188/recia.v11.n2.2019.733>

CAPÍTULO II

FATORES HIDRO CLIMÁTICOS E TRÓFICOS QUE REGULAM O TAMANHO MÁXIMO DAS ESPÉCIES NA ASSEMBLEIA DE PEIXES DE UM LAGO DE VÁRZEA.

RESUMO:

A redução do tamanho corporal das espécies em resposta a alterações climáticas tem sido relatada ao longo das últimas décadas em diferentes ecossistemas, em todo o globo. Usando uma série histórica de 20 anos de coletas mensais de peixes realizadas em um lago de várzea na Amazônia, na confluência dos rios Solimões e Negro, testamos a relação entre a variação das médias dos tamanhos máximos de das 11 espécies mais frequentes no tempo em função da posição trófica, vagilidade, uso de pela pesca comercial e dos efeitos de eventos hidroclimáticos extremos. Para tal, foram utilizados dois modelos lineares múltiplos, um deles considerando as diferenças interespecíficas na ponderação do efeito das variáveis sobre a média global modelo. Foi possível detectar a existência de uma relação positiva entre a posição trófica e o tamanho corporal quando as diferenças interespecíficas são desprezadas, e uma relação negativa significativa entre o tamanho e os eventos hidroclimáticos quando é ponderada a diferença de porte entre as espécies. Tais observações estão em consonância com diversos estudos realizados nos mais distintos ambientes.

Palavra-chave: Tamanho máximo, assembleia de peixes, eventos hidroclimáticos extremos, impactos antrópicos em ecossistemas aquáticos

ABSTRACT:

Size reduction in response to climate change has been reported over the last few decades in different ecosystems across the globe. Using a historical series of approximately 20 years, of monthly collections carried out in a floodplain lake in the Amazon at the confluence of the two largest rivers on the planet. We tested the relationship between the variation of the average maximum sizes as a function of hydroclimatic events, using mixed linear models. Where it was possible to detect the existence of a significant negative relationship between size and hydroclimatic events, and a positive one between

trophic position and size. Such observations are in line with several studies carried out in the most different environments

Key words: Maximum body size, fish assemblage, hydroclimatic events

INTRODUÇÃO

O tamanho do corpo é uma característica biológica e ecológica crucial que liga a morfologia, fisiologia e comportamento dos organismos, particularmente nos animais (Andersen et al., 2016; Schmidt-Nielsen & Knut, 1984). Ele afeta aspectos importantes da performance fisiológica-metabólica (Bystrom *et al.* 2006; Malerba *et al.* 2018; Fernandes & McMeans 2019), capacidade de movimento/dispersão e tamanho de área de vida (Reiss 1988), capacidade de procurar e capturar alimento (Biro et al., 2004, Byström e Andersson, 2005), além da fecundidade das fêmeas (Stearns 1992; Barneche et al. 2018; Röpke et al. 2019) e longevidade (Speakman 2005). Dessa forma, alterações na estrutura de tamanho dos organismos, sejam elas em nível populacional ou em nível de comunidades biológicas afetam diretamente e indiretamente o funcionamento dos ecossistemas.

Especificamente para peixes, as atividades de pesca e o aquecimento do ambiente aquático provocado por mudanças climáticas, têm sido relacionados como indutores da redução do tamanho dos indivíduos das espécies ao longo do tempo. A pesca, por meio da seleção e captura dos indivíduos de maior tamanho (Fisher et al. 2010), enquanto que o aquecimento do ambiente aquático exerce influência via redução na disponibilidade de oxigênio e seleção direta de tamanho menores por fatores ecológicos relacionados à alimentação, predação ou outras causas de mortalidade, ou ainda alterando a taxa de crescimento (Gardner et al. 2011; Audzijonyte et al. 2020, Audzijonyte et al 2019). Essas alterações no tamanho corporal dos componentes de assembleias biológicas implicam em efeito direto na relação predador-presa, uma vez que a retirada de indivíduos maiores reduz a pressão de predação sobre os demais elos da cadeia, ocasionando uma reestruturação trófica, o que pode afetar o tamanho da população e as tendências de distribuição (Shackell, et al. 2010, Millien, et al. 2006, Daufresne et al., 2009; Sheridan & Bickford, 2011).

É esperado que o nível trófico esteja positivamente correlacionado com o tamanho corporal (Elton 1927), visto que foram encontradas evidências de que as espécies de animais aquáticos com maior tamanho corporal são predominantemente predadores (Jennings et al., 2007; Arim et al. 2010, Barnes et al. 2010, Gilljam et al. 2011, Rille et al. 2011, Reum e Marshall 2013), embora esse padrão não seja tão claro nos ecossistemas tropicais de água doce (Keppeler et al. 2020). Além disso, comunidades inteiras demonstraram ser fortemente baseadas em tamanho (Jennings et al. 2002, Al-Habsi et al. 2008, Romero-Romero et al. 2016), indicando que o tamanho do organismo define restrições de primeira ordem na alimentação e, portanto, regula a estrutura da teia alimentar e as vias e a eficiência pelas quais a produção primária flui através dos ecossistemas (Ryther, 1969; Sheldon et al., 1972; Cohen et al., 1993; Sommer et al., 2002; Barnes et al., 2010).

Além disso, o tamanho exerce influência nos padrões comportamentais dos organismos. Por exemplo, espécies/indivíduos de maior tamanho têm maior capacidade de dispersão (Avaria-Llautureo et al., 2021), ou seja, os migradores de média e longa distância geralmente são organismos com tamanho corporal maior. Além disso, o tamanho também desempenha um papel importante no estabelecimento das espécies no novo local, já que os indivíduos que realizam esse movimento e chegam a novos habitats terão que competir por espaço e recurso alimentar, estando propensos a competição e pressão de predação (McCauley & Mabr 2011).

Para ambientes aquáticos tropicais, como a bacia Amazônica, o papel desses fatores sobre o tamanho corpóreo dos peixes é praticamente desconhecido, com poucos trabalhos desenvolvidos em ambiente natural. Aumento da temperatura e predominância de indivíduos menores têm sido encontrados em riachos com vegetação ripária desmatada (Ilha et al., 2018); no entanto, em grandes rios o efeito do aumento da temperatura não é tão evidente, uma vez que ele ocorre de modo cíclico e se faz mais evidente durante a seca fluvial. Durante esse período o ambiente aquático reduz muito em volume, a temperatura da água é maior e a quantidade de oxigênio menor, o que promoveria a seleção para tamanhos menores (Freitas et al., 2012; Barros & Albernaz, 2013; Freitas et al., 2013; Röpke et al 2017; Röpke et al. 2022).

Para compreender melhor a estrutura em tamanho da assembleia de peixes da várzea Amazônica em função de diferentes fatores estressores (característica trófica das

espécies, seu uso pela pesca comercial, e o efeito do tempo) no tamanho dos peixes dados os eventos de fortes secas dos últimos 15 anos, foi analisado um conjunto de dados com 20 anos de amostragens mensais. Para isso, foram selecionadas 11 espécies de peixes, incluindo diferentes níveis tróficos, e espécies submetidas ou não a pressões da pesca comercial e para subsistência. A principal questão abordada foi: a variação na média dos tamanhos máximos da assembleia é explicada por atributos ecológicos (posição trófica e vagilidade), impactos ambientais de pesca e severidade do período de águas baixas ou simplesmente pelo tempo, representando assim o efeito de múltiplos aspectos.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido no lago Catalão (3 ° 08'-3 ° 14 'S e 59 ° 53'-59 ° 58'), um lago de várzea localizado na ilha do Xiborena na confluência dos rios Negro e Solimões, próximo à cidade de Manaus, Amazonas, Brasil. Trata-se de uma área de terras baixas, formada por um complexo de lagos interconectados que aumentam e diminuem de tamanho de acordo com o nível da água dos rios adjacentes. A região apresenta clima quente úmido, com temperatura anual média em torno de 27°C e pluviosidade média de 2300 mm ano (INMET, 2020). O lago está inserido na extensão da várzea amazônica, que conta com uma área aproximada de 300.000 Km² (Junk & Furch, 1993). É um ambiente altamente dinâmico, influenciado pelo pulso de inundação, que contribui não só com a movimentação de sedimentos alterando a produtividade e conformação dos lagos e canais, mas também a variação do nível da água caracterizando quatro períodos hidrológicos: seca, enchente, cheia e vazante (Sioli, 1984; Junk 1980; Bittencourt & Amadio, 2007).

Amostragem dos peixes

Os espécimes foram coletados mensalmente entre outubro de 1999 e dezembro de 2019 à exceção de outubro de 2001 a setembro de 2002 quando houve interrupção do projeto. As amostragens foram realizadas usando um conjunto de 10 redes de emalhar (tamanhos de malha variando de 30 a 120 mm entre nós opostos) ao longo de 24 horas, e remoção dos peixes em intervalos de seis horas. A cada seis horas as redes eram revisadas, e os peixes despescados eram acondicionados em sacos plásticos contendo etiqueta com informações de data e hora, e colocados em caixas isotérmicas com gelo para conservação dos exemplares (mais detalhes em Ropke et al. 2016). No laboratório os espécimes foram

identificados no nível taxonômico de espécie, medidos no seu comprimento padrão (cm) e pesados (g). Este estudo foi realizado sob a legislação federal (SISBio 52392-1/2016) e compromisso institucional de pesquisa ética com animais (CEUA 032/2012).

Anomalias hidroclimáticas - severidade do período de águas baixas

As anomalias hidroclimáticas para a seca fluvial foram obtidas através da diferença entre a duração do período seco no ano e a média global dos dias de seca na série histórica medida no Porto de Manaus, Amazonas (1903-2018). Por exemplo: no ano de 1999 tivemos 88 dias de seca e 75,4 dias de média global, desta forma o valor da anomalia para esse ano corresponde a 12,60. Esse cálculo foi realizado para toda a série em que estamos trabalhando, com isso obtivemos os valores que foram utilizados para compor os modelos utilizados subsequentemente. A distribuição temporal das anomalias é apresentada na **Figura 1**. A quantificação dos dias de seca de cada ano seguiu o sugerido por Amadio e Bittencourt (2007), em que o primeiro dia de seca foi considerado como o primeiro dia de cota de 20 metros descendente na foz do Rio Negro, em Manaus, e o último dia de seca foi considerado como o de cota 20 metros ascendente.

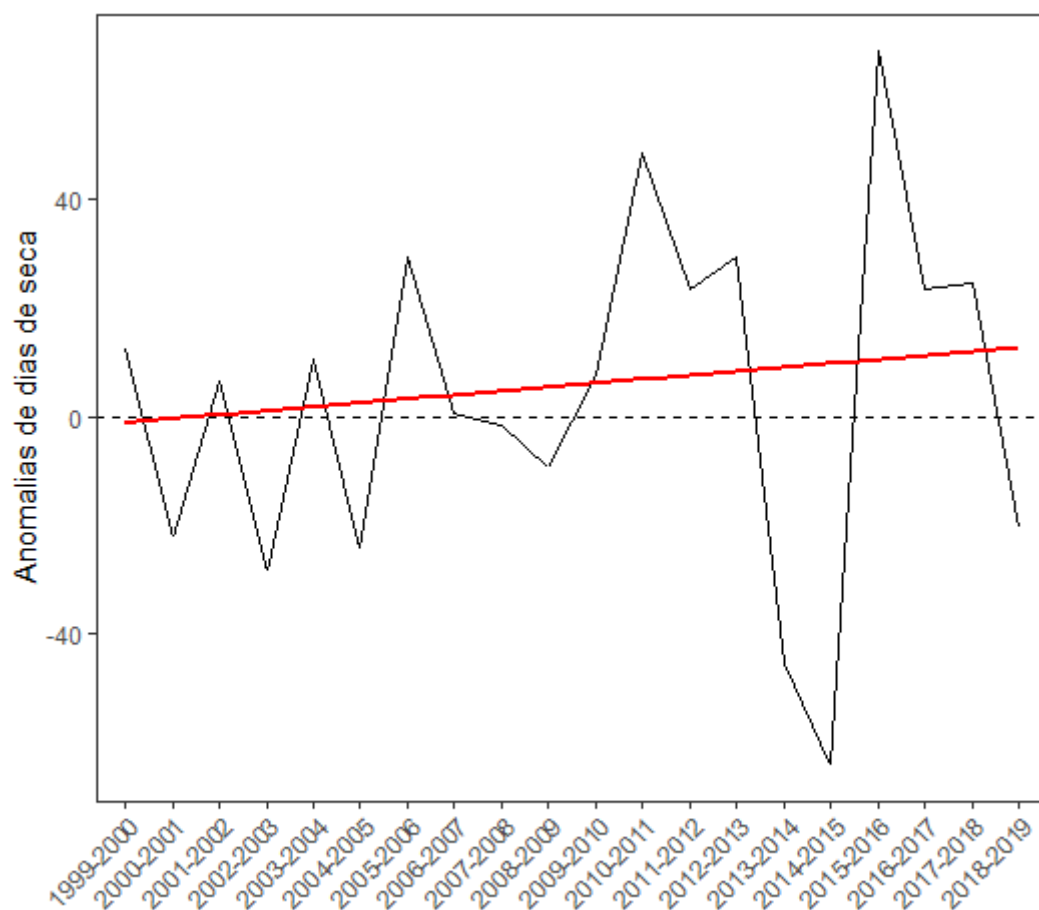


Figura 1 Série histórica das anomalias climáticas para o número de dias de seca fluvial – Lago Catalão, Manaus – Amazonas. Valores positivos indicam secas mais longas que a média, e quanto maior o valor, mais longa foi a seca em relação à média histórica; valores negativos indicam secas mais curtas que a média. Esses valores podem ser interpretados como dias a mais ou dias a menos em relação à seca média histórica.

Seleção das espécies, definição do nível trófico, classificação de vagilidade e pressão por pesca

Para investigar se o tamanho das espécies na assembleia de peixes vem decrescendo ao longo dos anos, selecionamos as espécies que ocorreram ao longo dos 19 anos de amostragem em todos os meses e que tivessem número amostral mensal > 5 . Cada ano foi contabilizado como o ano hidrológico entre o início da seca e o final da vazante de um ciclo de inundação (detalhado em Ropke et al. 2017; Röpke et al. 2022). Em todos os

casos foram excluídos das análises todos os indivíduos de comprimento padrão <10 cm, para minimizar problemas com a seletividade da arte de pesca utilizada na amostragem, conforme proposto por Sprules & Barth (2016), e para minimizar o efeito da super-representação de indivíduos jovens na estimativa do tamanho máximo.

A partir desses critérios, ao todo selecionamos 11 espécies (Tabela 1), cujos dados de comprimento máximo de cada espécie em cada ano amostrado foram transformados em log2 para garantir o escalonamento dos tamanhos (valores S = proxy do tamanho real). A média do tamanho máximo de cada espécie foi estimada como a média anual do tamanho máximo mensal.

A classificação do nível trófico foi baseada em valores extraídos do Fishbase (<https://www.fishbase.de/>), em verificação cruzada com dados obtidos na literatura. O FishBase determina o nível trófico com base em estimativas estatísticas baseadas em valores atribuídos ao principal item alimentar consumido, utilizando a equação a seguir:

$$TP_i = 1 + \sum p DC_{ip} \times Troph_p$$

Onde, a soma vai de 1 ao número total de itens de presas na dieta das espécies de peixes *i*. TP_i é a posição trófica da espécie *i*, $Troph_p$ é a PT do item alimentar *p*, enquanto DC_{ip} é a fração do item alimentar *p* na dieta da espécie *i*. Por exemplo, os produtores primários, que se alimentam de detritos e bactérias foram considerados como tendo um TP de 1 que foi adicionado a cada consumidor. Desta forma, um peixe comendo 50% de fitoplâncton/plantas (TP = 1) e 50% de zooplâncton herbívoro (TP = 2) terá um TP de $1 + (0,5 \times 1 + 0,5 \times 2) = 2,5$. Desta forma a posição trófica varia entre 2,0 (consumidores primários – herbívoros/detrítívoros) e 4,5 (predadores – carnívoros, omnívoros). Para *Hemiodus* sp. utilizamos nível trófico do gênero.

As espécies foram categorizadas em três possíveis classificações de vagilidade, seguindo aspectos descritos por Goulding (1979), Smith (1979), Lowe-McConnel (1987), Fernandes (1997) e Bailly et al. (2008). Sedentárias: espécies que se deslocam principalmente dentro do ambiente (lago); migradoras de curta distância: espécies com deslocamento sazonal, frequentemente migram para ambientes adjacentes, para fins tróficos; migradoras de média distância: compreendem as espécies reofilicas com eventos de migração sazonal, para fins reprodutivos ou tróficos (Tabela 1).

Para avaliar o efeito da pesca sobre o tamanho dos peixes, classificamos as espécies em duas categorias: pescada- aquelas que são alvo da pesca local de subsistência e pesca comercial regional; e não pescada - aquelas espécies que não são consumidas ou são pouco consumidas, mas têm captura ocasional e pequena na pesca de subsistência; essa categorização foi baseada em Santos & Santos (2005). Pesca de subsistência aqui foi considerada como o tipo de pescaria realizada por ribeirinhos destinada à alimentação dos seus familiares. Porém, quando o sucesso de captura é superior ao necessário para alimentação, parte da produção é vendida em feiras próximas às comunidades. Os autores ressaltam que esse tipo de pesca dificilmente tem sua produção contabilizada, uma vez que tem sua prática difundida e realizada informalmente por milhares de pessoas em toda a bacia.

Tabela 1 Classificação das onze espécies selecionadas para análise da variação das médias do tamanho máximo quanto à categoria de pesca, classificação trófica e vagilidade

Espécies	Categoria de Pesca	Classificação trófica	Categoria quanto a vagilidade
<i>Hoplosternum littorale</i> (Hancock, 1828)	Pescada	2,7	Sedentária
<i>Anodus elongatus</i> Agassiz, 1829	Pescada	3,4	Migradora de curta distância
<i>Hemiodus</i> sp.	Pescada	2,6	
<i>Pellona flavipinnis</i> (Valenciennes, 1837)	Não pescada	4,5	
<i>Pimelodus blochii</i> Valenciennes, 1840	Não pescada	3,1	
<i>Potamorhina latior</i> (Spix & Agassiz, 1829)	Pescada	2,0	
<i>Acestrorhynchus falcistrotris</i> (Cuvier, 1819)	Não pescada	3,9	Migradora de média distância
<i>Psectrogaster rutiloides</i> (Kner, 1858)	Não pescada	2,0	

<i>Triportheus albus</i> Cope, 1872	Pescada	2,7	
<i>Triportheus angulatus</i> (Spix & Agassiz, 1829)	Pescada	3,4	
<i>Triportheus auritus</i> (Valenciennes, 1850)	Pescada	2,8	

Análise de dados

Para avaliar os efeitos das anomalias hidroclimáticas sobre a média dos tamanhos máximos, foram usados dois tipos de modelo lineares. Primeiro, para investigar a relação do tamanho com anomalias de seca fluvial e potenciais forças que influenciam essa relação foi usado um modelo linear (LM). O LM foi estruturado com média dos tamanhos máximos (log2) de cada espécie como variável resposta, e como variáveis preditoras foram usados vagilidade, a posição do nível trófico e categoria de pesca de cada espécie. A vagilidade e categoria de pesca foram tratadas como variáveis binárias, e a posição do nível trófico como variável numérica.

Visto que há variação na média dos tamanhos máximos entre as diferentes espécies presentes na assembleia, nós estruturamos um modelo linear misto (LMM). Neste LMM, a média dos tamanhos máximos foi usada como variável resposta, os preditores foram os mesmos usados no modelo anterior, e a classificação taxonômica das espécies foi inserida como uma variável randômica de natureza categórica e incorporada ao LMM. Assim, os valores médios da variável resposta para cada variável preditora foram ponderados pelas diferenças entre as espécies. Todos os pressupostos de normalidade, independência e homogeneidade das variâncias foram verificados a partir dos resíduos dos modelos. Para o modelo LMM foi usado o pacote *nlme* com a função *lme*. Todas as análises foram realizadas no software R (R versão 3.6.1).

RESULTADOS

Analizamos a variação do tamanho máximo de aproximadamente 42.804 indivíduos ao longo de 18 anos de monitoramento mensal do lago do Catalão. Os resultados obtidos

através do modelo linear misto, que relacionou a variação dos tamanhos médios ao ano, vagilidade, nível trófico, categoria de pesca e severidade do período de águas baixas sem considerar as espécies como uma variável randômica no modelo, demonstrou que apenas o nível trófico teve uma relação positiva com as médias do tamanho máximo, sendo que os maiores tamanhos máximos estão nos níveis tróficos mais altos (Tabela 2 e Figura 2).

Tabela 2 Resultados do LMM - para testar o efeito das anomalias de seca sobre a média dos tamanhos máximos em relação a vagilidade, nível trófico e categoria de pesca sobre a assembleia de onze espécies de maior ocorrência na comunidade de peixes do Lago Catalão – Manaus – AM.

		Inclinação	Erro padrão	t	P	R ²
Modelo	Intercepto	4,136	5,856	0,706	0,481	0,262
	Ano	- 0,000	0,002	- 0,104	0,917	
	Nível trófico	0,147	0,022	6,510	9,91 e -10***	
	Cat_Pesca	0,056	0,034	-1,625	0,106	
	Vagilidade	0,000	0,033	0,019	0,985	
	Anomalias de seca	- 0,001	0,000	-1,445	0,150	
	Vagilidade: Anomalias de seca	0,000	0,001	0,164	0,870	

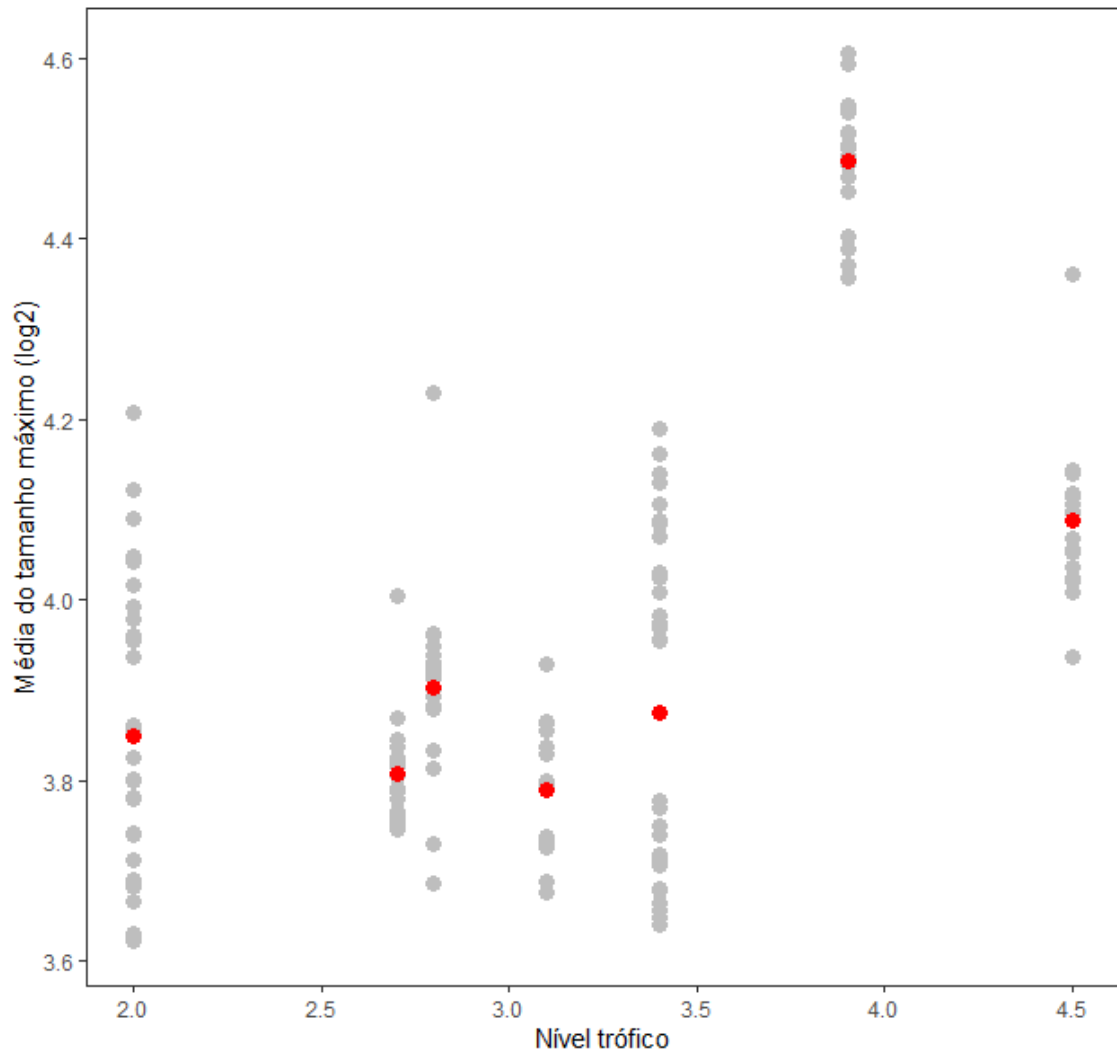


Figura 2 Representação gráfica dos resultados do modelo linear mistos, para a relação entre as médias do tamanho máximo da assembleia de peixes (11 espécies) e o nível trófico série temporal (1999- 2019). Os pontos em vermelho indicam a média.

Considerando a identidade das espécies como variável aleatória no modelo da média do tamanho máximo em relação às anomalias hidroclimática, vagilidade, nível trófico e o tempo (ano), os resultados do modelo apontam que a variável anomalia hidroclimática da seca fluvial foi a única a apresentar efeito significativo (Tabela 3). Essa variável teve uma relação negativa estatisticamente significativa, ou seja, para a maior parte das espécies, independente dos atributos considerados, quanto maior a anomalia de seca, menor a média de tamanho máximo das espécies (Tabela 3 e Figura 3).

Tabela 3 Resultados dos modelos lineares mistos – LMM para testar o efeito das anomalias de seca sobre a média dos tamanhos máximos em relação a vagilidade, nível trófico e categoria de pesca das onze espécies de maior ocorrência na comunidade de peixes do Lago Catalão – Manaus – AM

		Inclinação	Erro padrão	DF	T	P
Modelo	Intercepto	4,136	2,118	150	1,952	0,052
	Ano	- 0,000	0,001	150	- 0,291	0,770
	Nível trófico	0,147	0,089	5	1,636	0,162
	Cat_Pesca	- 0,056	0,139	5	- 0,408	0,699
	Vagilidade	0,000	0,133	5	0,000	0,996
	Anomalias de seca	- 0,001	0,000	150	- 4,039	0,001***
	Vagilidade: Anomalias de seca	0,000	0,000	150	0,459	0,646

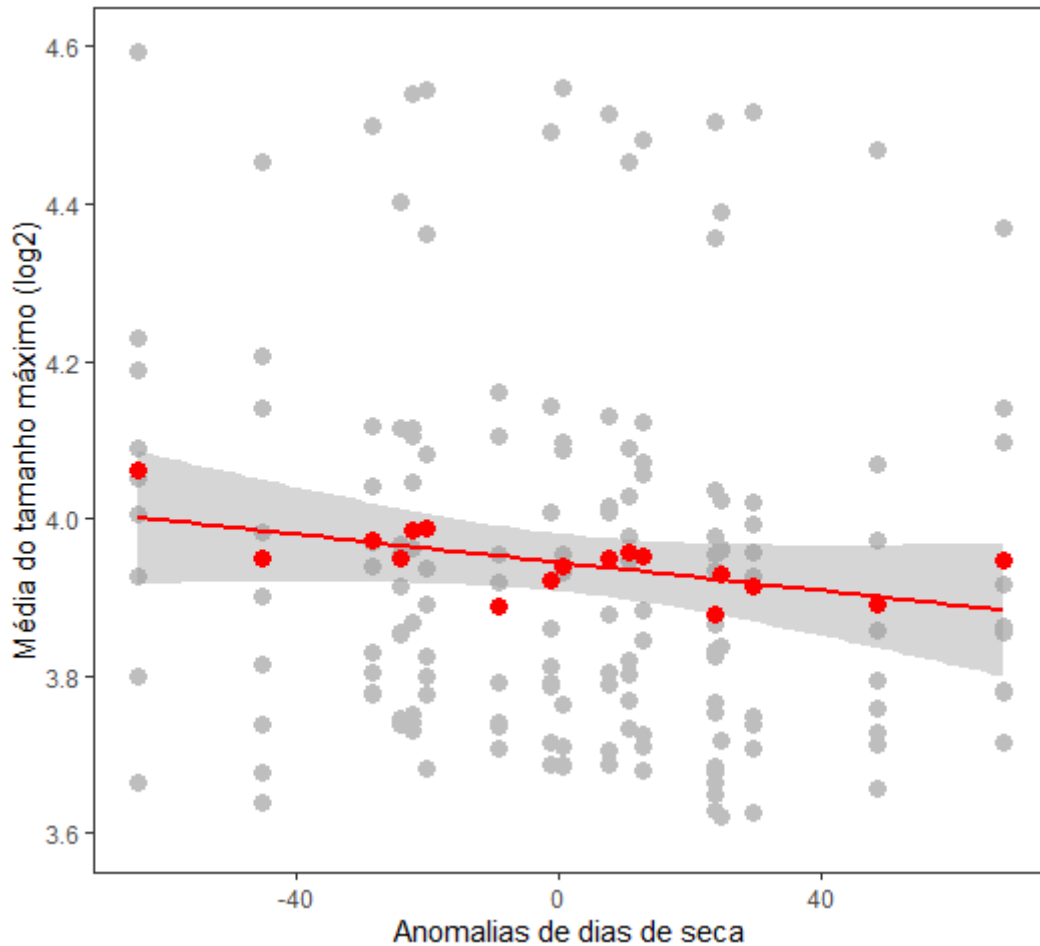


Figura 3 - Representação gráfica dos resultados do modelo linear mistos, relação entre as médias do tamanho máximo da assembleia de peixes (11 espécies) e anomalias hidroclimáticas do período de águas baixas (1999- 2019). Os pontos em vermelho indicam a média.

DISCUSSÃO

Nosso estudo apresentou os resultados das médias do tamanho máximo para uma assembleia de peixes de um lago de várzea amazônica, localizado na confluência dos rios Solimões e Negro. Testamos através de modelos lineares as relações entre tamanho máximo dos indivíduos, vagilidade, categoria trófica, categoria de pesca em função das anomalias hidroclimáticas de seca ao longo dos anos. Com isso foi possível observar uma grande flutuação das médias dos tamanhos máximos dentro das categorias testadas, que foram significativa e positivamente correlacionados ao nível trófico dos peixes, e negativamente correlacionado às anomalias hidroclimáticas de duração da seca fluvial.

A relação positiva e significativa encontrada entre o nível trófico e o tamanho na assembleia do Catalão de forma geral é um padrão esperado. Desde a origem da pirâmide trófica idealizada por Elton em 1927 este padrão é relatado tanto para ecossistemas aquáticos quanto para ambientes terrestres, contudo ele vai na contramão de alguns estudos em ambientes aquáticos de água doce. A maior parte dos estudos descrevem uma relação linear entre o tamanho e o nível trófico, principalmente em ambientes tropicais, onde se observa um alto intensidade de onívora (Wootton e Oemeke 1992; Floeter et al. 2005; Behrens e Lafferty 2007; Dantas et al. 2019). A detecção de relações positivas ou negativas em modelos estatísticos sobre o assunto tem sido sugerida como associada à escassez alimentar nos níveis tróficos superiores, o que leva a uma possível seleção de consumidores maiores em nível alimentar mais baixo para atender a demanda metabólica (Arim et al. 2007, Arim et al. 2010). Dantas et al. (2019) afirmam ainda que essa adaptação é mais forte nos trópicos por causa da relação positiva entre demanda energética e temperatura. A relação positiva encontrada em nossos resultados possivelmente deve estar ligada ainda ao fato de no Catalão não termos registros frequentes de espécies de grande porte com tendência à onívora ou herbívora entre as espécies mais frequentes no tempo, como nos demais ambientes aquáticos amazônicos.

A relação entre tamanho e capacidade de dispersão é observada tanto em ambientes terrestres quanto em ambientes marinhos, onde existe a comprovação de que indivíduos maiores têm maiores vantagens físicas e recursos energéticos (Arribas et al., 2012; Rundle et al., 2007; Yagi & Green, 2017), o que lhes permite deslocar-se a distâncias maiores e reduz os riscos de morte por predação (Travis et al., 2012). Murphy & Boone, (2022) e McCauley & Mabry (2011) consideram o tamanho um fator importante capaz de moldar a capacidade de dispersão dos indivíduos além de desempenhar um papel fundamental no estabelecimento no novo habitat. No nosso caso, estudos mais detalhados seriam necessários para tais afirmativas, mas indiscutivelmente efeitos da interação do tamanho do corpo e da dispersão permitirão uma compreensão mais completa dos efeitos das mudanças climáticas sobre a comunidade.

Recentemente, Röpke et al. (2022) estudaram 16 espécies da mesma área de estudo e relataram a redução no tamanho médio de fêmeas maduras ao longo do tempo, o que foi relacionado às anomalias climática que têm influenciado os períodos de seca e cheia na Amazônia, trazendo cheias mais severas e secas mais prolongadas e que afetam as taxas de recrutamento e causam mudanças no período reprodutivo. Os autores afirmam, ainda,

que essa redução é mais perceptível em espécies alvo da pesca comercial, corroborando a hipótese de que a redução do tamanho dos organismos não é causada por um fator específico, mas um conjunto de ações que desencadeiam essa resposta (Jennings & Kaiser, 1998; Jackson et al., 2001).

Mesmo analisando o tamanho sob um prisma diferente do de Röpke et al. (2022), nós também observamos a redução de tamanho das espécies na assembleia de peixes estudada no lago Catalão, o que nos leva a crer que possivelmente esta seja uma resposta a uma combinação de fatores: climáticos, ambientais e antrópicos. Uma vez que, variações temporais no tamanho dos peixes são relatadas em diversos estudos, alguns relacionam a ações antrópicas como a pesca predatória (Collie et al., 2008; Genner et al., 2010; Wilson et al., 2010). Dentro desta perspectiva, peixes maiores tendem a desaparecer em resposta à pressão da atividade pesqueira (Olden et al., 2007; Ripple et al., 2017), enquanto peixes menores respondem mais frequentemente à fragmentação de habitats, agricultura, poluição e desmatamento (Ripple et al., 2017). No nosso caso, acreditamos que a redução dos tamanhos observada é um reflexo combinado das anomalias hidroclimáticas de seca e atividade da pesca comercial que ocorre em outras áreas da bacia, já que a pesca realizada no lago Catalão atualmente é principalmente de subsistência e, portanto, de baixo impacto para a comunidade aquática, além da maior parte das espécies incluídas nesse estudo não serem de relevância para a pesca.

Tais observações nos levaram a levantar alguns questionamentos importantes, como por exemplo: existe a possibilidade dessa diminuição do tamanho afetar toda a dinâmica ecológica dentro do complexo Catalão, dado que a redução de tamanho influencia padrões ecológicos importantes como a predação? Outro ponto é que se essas alterações observadas refletem um impacto em escala regional no sistema Amazônico? uma vez que o complexo do Catalão é uma área de confluência e com poucas espécies e populações residentes (Röpke et al. 2016) e isso então significa que ao menos em parte, os indivíduos menores das espécies são oriundos de outras áreas e não refletem apenas um impacto local.

Esses questionamentos são importantes de serem elucidados já que estudos de modelagem apontam que a redução do tamanho do corpo de espécies pode levar ao aumento da mortalidade e uma taxa de redução da biomassa e produtividade do sistema em até 30% em ambientes marinhos (Astra et al., 2020). Fato é que ainda são poucos os estudos em ambientes dulcícolas, o que dificulta a nossa compreensão sobre processos

baseados em tamanho. Porém, apenas com base nas análises realizadas neste estudo, seria arbitrário afirmar que a redução do tamanho observada seria capaz de interferir na dinâmica ecológica da região da ponta do Catalão; além disso, os organismos desse ecossistema podem ter um grande poder de adaptação (Astra et al., 2020), e uma série de 19 anos para prever mudanças ecossistêmicas relacionadas a alterações do clima talvez seja insuficiente. Contudo, discussões sobre esse prisma em ambientes aquáticos dulcícolas são poucas, principalmente em função da escassez de bancos de dados com séries históricas longas, onde seguramente é mais provável detectar padrões.

Desta forma, consideramos que seria importante monitoramentos de longo prazo para tomada de dados ambientais mais detalhados, como, por exemplo, informações sobre a área do lago, profundidade, padrões de conectividade. Além de informações acerca do comportamento e uso dos recursos locais, como a pesca de subsistência, exploração da vegetação local dentre outras.

REFERÊNCIAS

- Arim M, Abades SR, Laufer G, Loureiro M, Marquet PA (2010) Food web structure and body size: trophic position and resource acquisition. *Oikos* 119:147–153. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2009.17768.x>
- Arim M, Bozinovic F, Marquet PA (2007) On the relationship between trophic position, body mass and temperature: reformulating the energy limitation hypothesis. *Oikos* 116:1524–1530. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15768.x>
- Arribas, P., Velasco, J., Abellán, P., Sánchez-Fernández, D., Andújar, C., Calosi, P., Millán, A., Ribera, I., & Bilton, D. T. (2012). Dispersal ability rather than ecological tolerance drives differences in range size between lentic and lotic water beetles (coleoptera: Hydrophilidae). *Journal of Biogeography*, 39(5), 984–994. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02641.x>
- Audzijonyte A, Richards SA, Stuart-Smith RD, Pecl G, Edgar GJ, Barrett NS, Payne N, Blanchard JL. Fish body sizes change with temperature but not all species shrink with warming. *Nat Ecol Evol.* 2020 Jun;4(6):809-814. doi: 10.1038/s41559-020-1171-0. Epub 2020 Apr 6. PMID: 32251381.
- Audzijonyte, A. et al. Is oxygen limitation in warming waters a valid mechanism to explain decreased body sizes in aquatic ectotherms? *Global Ecology and Biogeography* 28, 64-77 (2019).
- Avaria-Llautureo, J., Venditti, C., Rivadeneira, M.M. et al.(2021) Historical warming consistently decreased size, dispersal and speciation rate of fish. *Nat. Clim. Chang.* 11, 787–793. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01123-5>
- Barthem, R.B. e Goulding, M. (1997). *The Catfish Connection: Ecology, Migration, and Conservation of Amazon Predators*. New York, Columbia University Press. 144p.
- Behrens MD, Lafferty KD (2007) Temperature and diet effects on omnivorous fish performance: implications for the latitudinal diversity gradient in herbivorous fishes. *Can J Fish Aquat Sci* 64:867–873. <https://doi.org/10.1139/f07-063>

- Bergmann, C. (1847) U"ber die Verha"ltnisse der warmeokonomie die Thiere zu ihrer gro"sse. Go"ttinger Studien 3, 595–708
- Calder, W.A.I. (1984) Size, Function and Life History, Harvard University Press
- Dantas, D. D. F. et al. (2019). Data from: Climate effects on fish body size–trophic position relationship depend on ecosystem type. – Dryad Digital Repository, <<http://dx.doi.org/10.5061/dryad.3pj6958>>.
- Fisher, J. A., Frank, K. T. & Leggett, W. C. Breaking Bergmann's rule: truncation of Northwest Atlantic marine fish body sizes. *Ecology* 91, 2499-2505 (2010).
- Floeter SR, Behrens MD, Ferreira CEL, Paddock MJ, Horn MH (2005) Geographical gradients of marine herbivorous fishes: patterns and processes. *Mar Biol* 147:1435–1447. <https://doi.org/10.1007/s00227-005-0027-0>
- Forster, J., Hirst, A. G. & Atkinson, D. (2012) Warming-induced reductions in body size are greater in aquatic than terrestrial species. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 19310-19314, doi:10.1073/pnas.1210460109.
- Isaac, J.L. (2009) Effects of climate change on life history: implications for extinction in mammals. *Endang. Species Res.* 7, 115–123
- Jennings, S. & Kaiser, M.J. (1998) The effects of fishing on marine ecosystems. *Advances in Marine Biology*, 34, 201– 352.
- Keppeler FW, Montaña CG, Winemiller KO (2020) The relationship between trophic level and body size in fishes depends on functional traits. *Ecol Monogr* 00:e01415. <https://doi.org/10.1002/ecm.1415>
- McClure, M. L., Hansen, A. J., & Inman, R. M. (2016). Connecting models to movements: Testing connectivity model predictions against empirical migration and dispersal data. *Landscape Ecology*, 31(7), 1419–1432. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0347-0>
- Millien, V. et al. (2006) Ecotypic variation in the context of global climate change: revisiting the rules. *Ecol. Lett.* 9, 853–869

- Murphy, Mason & Boone, Michelle. (2022). Evaluating the role of body size and habitat type in movement behavior in human-dominated systems: A frog's eye view. *Ecology and Evolution*. 12. 9022. [10.1002/ece3.9022](https://doi.org/10.1002/ece3.9022).
- Ozgul, A. et al. (2010) Coupled dynamics of body mass and population growth in response to environmental change. *Nature* 466, 482–485
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Hoffmann, M., Wirsing, A. J., & McCauley, D. J. (2017). Extinction risk is most acute for the world's largest and smallest vertebrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, 10678–10683
- Roff, D.A. (2002) *Life History Evolution*, Sinauer Associates
- Rundle, S. D., Bilton, D. T., & Foggo, A. (2007). By wind, wings or water: Body size, dispersal and range size in aquatic invertebrates. In A. G. Hildrew, D. G. Raffaelli, & R. Edmonds-Brown (Eds.), *Body size: the structure and function of aquatic ecosystems* (pp. 186–209). Cambridge University Press
- Schmidt, N.M. and Jensen, P.M. (2005) Concomitant patterns in avian and mammalian body length changes in Denmark. *Ecol. Soc.* 10, 5
- Shackell, N. et al. (2010) Decline in top predator body size and changing climate alter trophic structure in an oceanic ecosystem. *Proc. R. Soc. Lond. B* 277, 1353–1360
- Wootton JT, Oemke MP (1992) Latitudinal differences in fish Community trophic structure, and the role of fish herbivory in a Costa Rican stream. *Environ Biol Fish* 35:311–319. <https://doi.org/10.1007/BF00001899>
- Yagi, K. T., & Green, D. M. (2017). Performance and movement in relation to postmetamorphic body size in a pond-breeding amphibian. *Journal of Herpetology*, 51(4), 482–489. <https://doi.org/10.1670/17-058>

CAPÍTULO III

EXISTE VARIAÇÃO NO ESPECTRO DE TAMANHO DE PEIXES SOB INFLUENCIA DE SECAS EXTREMAS EM UM LAGO DA VÁRZEA AMAZÔNICA.

RESUMO

Desde trabalho seminal de Sheldon (1967), a análise do espectro de tamanho dos organismos vem sendo utilizada para compreender os efeitos de distúrbios ambientais em diversos ecossistemas. O objetivo do nosso trabalho foi verificar se as secas extremas estão contribuindo para a redução do espectro de tamanho dos peixes em um lago de várzea amazônico. Para tal usamos uma série temporal de 18 anos de coletas mensais, a nossa hipótese é que o aumento da frequência de secas extremas na Amazônia tem contribuído para a redução do espectro de tamanho dos peixes. Contrariando as nossas expectativas os eventos de seca não influenciaram o espectro de tamanho dos peixes de forma negativa; entretanto, nossos resultados revelaram declínios na abundância e distribuição de tamanho das espécies do lago Catalão., não podemos relacionar esse declínio às variações da cota e intensidade de seca.

Palavras chave: tamanho do corpo, abundância de peixes, seca, *turnover*, escala temporal

ABSTRACT:

Since Sheldon's seminal work in 1967, the size spectrum has been used to understand the effects of environmental disturbances on different ecosystems. The objective of our work was to verify if extreme droughts are contributing to the reduction of the size spectrum of fish in an Amazonian floodplain lake. For this, we used a time series of 18 years of monthly collections, our hypothesis is that the increase in the frequency of extreme droughts in the Amazon has contributed to the reduction of the size spectrum of the fish. Contrary to our expectations, drought events did not influence the fish size spectrum in a negative way, although our results revealed declines in the abundance and size distribution of species in Catalão lake, we cannot relate this decline to variations in quota and intensity of drought.

Keywords: body size, fish abundance, drought, species turnover, temporal scale

INTRODUÇÃO

O tamanho do corpo é comumente usado como uma característica de história de vida na investigação ecológica de processos comportamentais, funcionais, mortalidade, crescimento e reprodução, dentre outros (Woodward et al., 2005; Petchey et al., 2008; Xu et al., 2013; Guet et al., 2016; Wang et al., 2016). A relação entre abundância e tamanho dos organismos é um padrão reconhecido desde que a Ecologia surgiu como uma disciplina formal (Sprules et al. 2015). Muitos ecólogos reconhecem que as comunidades ecológicas são estruturadas em tamanho, por meio da relação entre tamanho corporal e abundância observada em diversos ecossistemas terrestres e aquáticos (Reuman et al. 2008; Trebbico et al. 2013; Sprules e Barth 2016).

O estudo pioneiro sobre espectro de tamanho realizado por Sheldon et al. (1972) mostra regularidades marcantes na distribuição de biomassa e abundância de organismos aquáticos, e entre os vários padrões observados, está a relação inversa entre abundância e tamanho. Entre as razões para essa relação inversa estão o aumento nas demandas metabólicas de organismos maiores, a relação positiva de tamanho entre predador e presa (predação limitada pela abertura da boca) e as perdas de energia durante a transferência entre níveis tróficos (Brown et al. 2004; Brose et al. 2006; Sprules e Barth 2016).

O espectro de tamanho é frequentemente modelado por meio de uma distribuição da lei de potência (Andersen et al. 2016; Sprules e Barth 2016; Edwards et al. 2017). Uma vez que essa relação negativa representa um equilíbrio trófico do ecossistema (Andersen et al. 2016), a perda de certos tamanhos de organismos na comunidade tem efeito direto sobre a dinâmica *bottom-up* e *top-down* nas teias tróficas, levando a importantes mudanças nesses padrões (Woodward et al. 2016). Por isso, ela tem sido proposta como um indicador ambiental do efeito da sobrepesca, por exemplo, uma vez que a pesca seletiva elimina predominantemente os maiores indivíduos das maiores espécies (Havey et al. 2006, Andersen and Pedersen 2010; Datta and Blanchard 2016);

Os ecossistemas estão sob pressão antrópica e alterações ambientais que ocorrem em diferentes níveis de organização biológica, de indivíduos a ecossistemas, trazendo inúmeras consequências negativas. Identificar a resposta das comunidades ecológicas a essas alterações é importante para a implementação de medidas conservacionistas mais eficazes (Karr e Chu 1999; Vos et al. 2000) e um manejo realmente sustentável dos recursos naturais. Uma alternativa aos estudos ecológicos com abordagens taxonômicas,

comumente aplicadas ao longo dos anos para avaliar a saúde dos ecossistemas, é a caracterização da estrutura da comunidade por meio da distribuição de tamanho dos organismos, independentemente de suas identidades taxonômicas. Isso possibilita a utilização de modelos matemáticos mais simples com o mesmo objetivo de entender e prever como os ecossistemas estão mudando em resposta a pressões antrópicas e alterações ambientais (Blanchard et al., 2017). Entender como o tamanho pode ser alterado pelos impactos antropogênicos é um importante desafio contemporâneo para a Ecologia, especialmente com a crescente aceleração das taxas de perda de biodiversidade e mudanças climáticas (Pimm, 2009; Montoya & Raffaelli, 2010; Van Rjin et al., 2017).

De todas as regiões do planeta, segundo Marengo et al. (2007, 2009), a América do Sul é uma mais vulneráveis às alterações climáticas que ocorrem em escala global, sejam aquelas ocasionadas pelas variações interanuais naturais como o aquecimento ou resfriamento do oceano Pacífico que causam os fenômenos El Niño e La Niña, quanto aquelas antrópicas, originadas de queima de combustíveis fósseis, industrialização e queimadas, que resultam em aquecimento do oceano Atlântico. Espécies tropicais são relativamente mais vulneráveis ao aquecimento do clima do que as espécies que vivem em altas latitudes, porque essas espécies são submetidas a temperaturas muito próximas do máximo tolerável (Deutsch et al. 2008; Buckley et al., 2013; Diamond et al. 2013), mesmo que a taxa de aquecimento do clima seja menor nos trópicos (IPCC 2007). Portanto, não é arbitrário dizer que esta é a região do planeta que mais sofrerá os efeitos de eventos climáticos extremos nos próximos anos (Grimm & Natori, 2006; Hirota Oyama & Nobre, 2011., Wines, 2016).

Em 2005 e 2010, grandes porções da Bacia Amazônica ocidental sofreram a seca mais severa dos últimos 40 anos e a mais intensa dos últimos 100 anos (Brown et al., 2006; Marengo et al 2012; Marengo et al 2013). As referidas secas, intercaladas pelas cheias excepcionalmente grandes de 2009 e 2012, são alguns exemplos das alterações climáticas recentes observadas na Amazônia. Os efeitos desses eventos ainda são pouco conhecidos, mas alguns estudos apontam que secas fluviais extremas têm impactos negativos fortes e duradouros sobre as assembleias de peixes (Freitas et al., 2013; Röpke et al., 2017). Os resultados desses estudos sugerem mudanças na organização trófica da assembleia de peixes após a seca de 2005, e Röpke et al. (2017) também encontraram efeito que parece ser dependente do porte da espécie e relacionados aos diferentes grupos funcionais, sendo que . após a seca de 2005 a abundância de espécies de pequeno porte foi

proporcionalmente maior que a de grupos de grande porte. Efeito semelhante foi detectado por Fabré et al. (2017) a partir de dados de desembarques pesqueiros nos rios Amazonas, Purus e Madeira . Esses resultados indicam que as assembleias de peixes podem ter sofrido mudanças na organização trófica em termos de equilíbrio de massa da pirâmide alimentar, que teriam como reflexo as mudanças na distribuição de tamanho ao longo do tempo, entre os níveis tróficos.

Uma vez que o impacto esperado de secas extremas pode não ser homogêneo entre organismos, considerando as diferenças idiossincráticas das espécies e também o seu porte (ou tamanho máximo), neste estudo utilizamos modelos de espectros de tamanho para avaliar de que forma as mudanças na abundância e tamanho corporal dos peixes de uma assembleia de lago de várzea na Amazônia Central, estão relacionadas aos eventos hidrológicos de secas extremas.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudos

O presente estudo foi desenvolvido no lago Catalão (3 ° 08'-3 ° 14 'S e 59 ° 53'-59 ° 58'), um lago de várzea localizado na ilha do Xiborena na confluência dos rios Negro e Solimões, próximo à cidade de Manaus, Amazonas, Brasil. Trata-se de uma área de terras baixas, formada por um complexo de lagos interconectados que aumentam e diminuem de tamanho de acordo com o nível da água dos rios adjacentes. A região apresenta clima quente úmido, com temperatura anual média em torno de 27°C e pluviosidade média 2300 mm ano (INMET, 2020). O lago está inserido na extensão da várzea amazônica, que conta com uma área aproximada de 300.000 Km² (Junk & Furch, 1993). É um ambiente altamente dinâmico, influenciado pelo pulso de inundação, que contribui não só com a movimentação de sedimentos alterando a produtividade e conformação dos lagos e canais, mas também a variação do nível da água caracterizando quatro períodos hidrológicos: seca, enchente, cheia e vazante (Sioli, 1984; Junk 1980; Bittencourt & Amadio, 2007)

Dados hidrológicos

Nosso conjunto de dados abrange uma série histórica de 18 anos, de outubro/1999 a setembro/2019, exceto o intervalo de 2001/2002 e 2005/2006 devido à amostragem incompleta. Vale ressaltar que para este trabalho consideramos o ano hidrológico, que

inicia na seca de um ano e finaliza na vazante do ano seguinte, de acordo com a sequência dos períodos hidrológicos (seca, enchente, cheia e vazante), caracterizados por Bittencourt & Amadio (2007) para a área do Catalão a partir dos dados de nível da água obtidos no site do Porto de Manaus (<https://www.portodemanaus.com.br>). Dessa forma, o período de seca do regime fluvial para cada ano foi definido como os valores de limites de cotas iguais ou inferiores a 20 metros. Os valores de cotas são obtidos através da média entre os valores diários do nível do rio Negro e o número de dias observados. Para cada ano foram estimados dois atributos da seca: severidade, que foi representada pelo valor mínimo da cota de nível da água do rio Negro; e a duração em dias, que representa o número de dias entre a cota de 20 m descendente e 20 m ascendente no nível da água (Ropke et al. 2017)

Amostragem dos peixes

Os espécimes foram coletados mensalmente usando um conjunto de 10 redes de emalhar (tamanhos de malha variados 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm, 70 mm, 80 mm, 100 mm, 110 mm e 120 mm entre nós opostos) ao longo de 24 horas e capturas de intervalo de seis horas. A cada seis horas as redes eram despescadas, os peixes acondicionados em sacos plásticos contendo etiqueta com informações de data e hora. Posteriormente os sacos eram colocados em caixas isotérmicas com gelo para conservação dos exemplares. Após cada despesca as redes eram mantidas no mesmo local onde foram dispostas na primeira hora (mais detalhes em Ropke et al. 2016). No laboratório, identificamos espécimes em nível taxonômico de espécie / gênero, cada espécime medido quanto ao comprimento padrão (cm) e peso total (g). Este estudo foi realizado sob a legislação federal (SISBio 52392-1 / 2016) e compromisso institucional de pesquisa ética com animais (CEUA 032/2012).

Análise do espectro de tamanho

Para a análise do espectro de tamanho foi usado a abundância de todos os indivíduos capturados ao longo dos anos de amostragem. O Espectro de Tamanho de Abundância Normalizado foi usado como um proxy para fornecer informações/estimativas sobre a produtividade (a partir do intercepto 'y' do espectro) e eficiência ecológicas da assembleia de peixes (Daan et al., 2005; Mehner et al., 2018; Rice and Gislason, 1996).

Para a implementação do espectro de tamanho, primeiro as medidas de tamanho corporal foram logaritmizadas (\log_2) e agrupadas em cinco classes de tamanho: 1° classe $\geq 3,54$ \cong (varia 11,6 – 16,2 cm); 2° classe $\geq 4,02$ \cong (varia 16,3 – 22,7 cm); 3° classe $\geq 4,51$ \cong

(varia 22,8 – 31,8 cm); 4° classe $\geq 5,0 \cong$ (varia 31,9 – 44,5 cm); 5° classe $\geq 5,5 \cong$ (varia 44,7 – 62,5 cm). O valor médio foi utilizado como representativo do ponto médio da Classe (PMC). Os indivíduos de tamanho corporal <10 cm foram excluídos da análise para minimizar os problemas de seletividade da arte de pesca, como proposto por Sprules & Barth (2016). Espécimes de menor tamanho são amostrados de maneira ineficaz pelo uso de malhadeiras. A abundância de cada classe de tamanho foi estimada calculando o número de peixes por área de rede de malhadeira em um período de 24 horas (captura por unidade de esforço, CPUE) para período de seca. Normalizamos o valor da abundância para cada classe dividindo pela largura linear da classe (Sprules & Barts, 2016) e, finalmente, transformamos em \log_2 os valores resultantes. Apesar das recomendações recentes contra o uso de uma representação agrupada para estimativa da inclinação do espectro de tamanho (Edwards et al. 2017), nós a escolhemos pelas seguintes razões: (i) nosso objetivo não era obter estimativas absolutas da inclinação real do espectro de tamanho, mas inferir sua resposta relativa aos preditores ambientais e (ii) queríamos testar mudanças na interceptação do espectro de tamanho, uma medida de produtividade, na mesma análise. Nossa escolha de apenas algumas (cinco) e amplas classes de tamanho também ajuda a minimizar problemas com estimativas imprecisas de declividade, segundo White et al. (2008).

Para testar a variação interanual no espectro do tamanho dos peixes associado à estação seca, modelamos o NAS usando um modelo de efeito misto não linear no pacote *nlme* (Pinheiro et al., 2020). O $\log_2(\text{CPUE})$ normalizado foi definido como uma variável de resposta e o ponto médio das classes de tamanho foi utilizado como uma covariável. Os preditores ambientais foram o nível mínimo de água (m) e a duração da estação seca (dias). Incluímos efeitos hidrometeorológicos tardios (um, dois e três anos após o momento de obtenção dos dados originais de capturas). Tomamos essa decisão porque as defasagens do pulso de inundação afetaram as capturas de pesca de todas as espécies juntas na Bacia Amazônica, e efeitos tardios semelhantes foram encontradas para as capturas de peixes agrupadas em grupos de espécies alvo da pesca no Baixo Amazonas (de Mérona e Gascuel, 1993; Castello et al., 2015; Isaac et al. 2016) e na abundância de juvenis para espécies de peixes comerciais Bailey et al 2018; Castello et al 2019). Utilizamos um modelo de inclinações aleatórias, com o ano como fator aleatório tanto para o intercepto quanto para a inclinação na relação do tamanho. Adicionamos uma estrutura de erro (termo autorregressivo de primeira ordem, AR1) para controlar a

potencial autocorrelação temporal. Os efeitos fixos incluíram os principais preditores e todas as suas interações. Antes de executar a análise, centralizamos os preditores para amenizar problemas de multicolinearidade entre variáveis e suas interações (Burnham, 2002). Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2021).

RESULTADOS

No total, analisamos dados de tamanho de aproximadamente 35.938 indivíduos capturados com rede de emalhar no lago Catalão ao longo da série histórica de 18 anos de monitoramento. O tamanho dos peixes capturados variou entre 11.6 a 62.5 cm CP. Não houve autocorrelação temporal significativa, mesmo nas análises que incluíram o atraso interanual do efeito da inundação hidrológica em um determinado ano sobre a biomassa de peixes disponível para pesca. (Tabela 4).

Tabela 4 Matriz de autocorrelação cruzada entre as variáveis, considerando de zero a três anos de tempo de retardo no efeito entre variáveis. PMC- ponto médio da classe; severidade - valor mínimo de nível da água; Duração - número de dias de seca fluvial

		Intercepto	PMC	Severidade	Duração	PMC: Severidade	PMC: Duração
	PMC	- 0,938					
	Severidade	- 0,024	0,000				
Sem Lag	Duração	- 0,026	0,000	0,859			
	PMC: Severidade	0,000	0,000	- 0,961	- 0,823		
	PMC: Duração	0,000	0,000	- 0,824	- 0,961	0,857	
	Severidade: Duração	0,242	0,000	- 0,101	- 0,107	0,000	0,000
		Intercepto	PMC	Severidade	Duração	PMC: Severidade	PMC: Duração
	PMC	- 0,922					

	Severidade	- 0,041	0,000				
Lag -1	Duração	- 0,036	0,000	0,859			
	PMC: Severidade	0,000	0,000	- 0,943	- 0,810		
	PMC: Duração	0,000	0,000	- 0,808	- 0,946	0,857	
	Severidade: Duração	0,260	0,000	- 0,157	- 0,138	0,000	0,000
		Intercepto	PMC	Severidade	Duração	PMC: Severidade	PMC: Duração
	PMC	- 0,927					
	Severidade	- 0,022	0,000				
Lag-2	Duração	- 0,021	0,000	0,847			
	PMC: Severidade	0,000	0,000	- 0,952	- 0,805		
	PMC: Duração	0,000	0,000	- 0,805	- 0,952	0,845	
	Severidade: Duração	0,242	0,000	- 0,091	- 0,086	0,000	0,000
		Intercepto	PMC	Severidade	Duração	PMC: Severidade	PMC: Duração
	PMC	- 0,923					
	Severidade	- 0,017	0,000				
Lag-3	Duração	- 0,005	0,000	0,836			
	PMC: Severidade	0,000	0,000	- 0,956	- 0,802		

	PMC: Duração	0,000	0,000	- 0,800	- 0,956	0,837	
	Severidade: e: Duração	0,268	0,000	- 0,065	- 0,017	0,000	0,000

A inclinação e o intercepto do espectro de tamanho apresentaram relação negativa com o tamanho ao longo da série histórica (Tabela 5) indicando que a assembleia é organizada em estrutura de tamanho. No entanto, essa interação não foi significativa com a duração e a severidade de eventos de seca extrema (Tabela 5). Isso quer dizer que os eventos de seca não geraram mudanças na inclinação da reta nem no intercepto, ou seja, não houve alteração na produtividade do lago Catalão. Ainda que as secas atuem em outros aspectos ecológicos nos ambientes de várzea, não houve uma atuação direta sobre os espectros de tamanho, mesmo que todas as interações testadas tenham apresentando um bom ajuste ($R^2= 0.71$). Não houve diferença na resposta do espectro de tamanho mesmo quando a análise foi realizada usando atrasos interanuais (lags) de até 3 anos (Tabela 5).

Tabela 5 Resultados do modelo – LMM para testar o efeito da duração e intensidade da seca sobre o SS de abundância da comunidade de peixes do lago Catalão.

		Inclinação	Erro padrão	t	P	R²
Sem Lag	Intercepto	2,267	0,194	11,706	0,000	0,71
	Tamanho	- 0,507	0,045	-11,189	0,000	
	Duração da Seca	-	-	-	-	
	Severidade da seca	0,005	0,011	0,430	0,674	
	Tamanho: Duração da seca	- 0,001	0,003	- 0,438	0,663	
	Tamanho: severidade da seca	- 0,011	0,048	- 0,234	0,816	
	Duração da seca: Severidade da seca	0,000	0,001	0,151	0,882	

Lag - 1	Intercepto	2,165	0,165	13,105	0,000	0,75
	Tamanho	- 0,486	0,040	- 12,278	0,000	
	Duração da Seca	0,003	0,011	0,308	0,763	
	Severidade da seca	0,198	0,176	1,124	0,281	
	Tamanho: Duração da seca	- 0,001	0,003	- 0,207	0,837	
	Tamanho: severidade da seca	- 0,043	0,043	- 1,001	0,321	
	Duração da seca: Severidade da seca	0,000	0,001	0,033	0,974	
Lag - 2	Intercepto	2,062	0,162	12,743	0,000	0,74
	Tamanho	- 0,471	0,041	- 11,585	0,000	
	Duração da Seca	0,005	0,011	0,419	0,683	
	Severidade da seca	0,141	0,174	0,808	0,435	
	Tamanho: Duração da seca	- 0,001	0,003	- 0,293	0,771	
	Tamanho: Severidade da seca	- 0,031	0,045	- 0,695	0,490	
	Duração da seca: Severidade da seca	- 0,001	0,001	- 0,567	0,581	
Lag - 3	Intercepto	2,053	0,176	11,759	0,000	0,73
	Tamanho	- 0,463	0,043	-10,649	0,000	
	Duração da Seca	- 0,004	0,013	- 0,227	0,787	
	Severidade da seca	- 0,055	0,183	- 0,299	0,770	
	Tamanho: Duração da seca	0,001	0,003	0,229	0,820	

Tamanho: Severidade da seca	0,012	0,047	0,260	0,796	
Duração da seca: Severidade da seca	0,000	0,001	0,163	0,874	

DISCUSSÃO

Constatamos, por meio de modelos de espectro de tamanho, que a assembleia de peixes do lago Catalão segue uma organização de abundância estruturada pelo tamanho e que é consistente temporalmente. Apesar das variações hidrológicas recentes influenciando a perda de qualidade de habitat e mortalidade dos peixes, os eventos de secas não influenciaram de maneira direta o espectro de tamanho da comunidade de peixes do lago Catalão ao longo dos últimos 18 anos. Isso contraria nossa hipótese de que a seca teria uma influência direta e negativa no espectro de tamanho da assembleia de peixes principalmente pela perda de indivíduos de maior porte. Este pode ser considerado o primeiro trabalho usando modelo de espectro de tamanho para analisar os efeitos de secas extremas em comunidades de peixes em um lago de várzea amazônico não explorado pela pesca comercial e incluindo dados dos eventos climáticos drásticos recentes mais fortes (2005, 2010 e 2015).

É assumido que o ajuste linear do espectro de tamanho está relacionado à estabilidade do ecossistema, o que significa que um desvio dessa linearidade (ou seja, baixo ajuste linear) pode implicar em pulsos de energia que passam pelo sistema e não são assimilados, fazendo com que esses ambientes se tornem, portanto, ecossistemas instáveis (Quinones et al. 2003; Rodriguez e Mullin, 1986). Possivelmente essas variações encontradas nos espectros da comunidade de peixes do lago Catalão podem ser uma resposta às mudanças no regime hidrológico (Marengo et al 2018; Espinoza et. al 2018) que vêm ocorrendo na dinâmica do pulso de inundação como um todo e não apenas um período sazonal de águas baixas como nós supúnhamos.

A região de várzea tem como principal característica as inundações periódicas (i.e. pulso de inundação), com uma alta produtividade primária, sendo o principal ambiente que sustenta as atividades produtivas (pesca, agropecuária) da região (Junk, 1980; Isaac; Barthem, 1995; Goulding et al., 2019). A alta produtividade das planícies de várzea amazônica é explicada por variações do nível da água, que estabelecem períodos

alternados de ampla conexão na cheia, com consequente aumento da disponibilidade de habitats, e de isolamento dos corpos d'água, no período da seca (Junk; Bayley; Sparks, 1989; Junk; Wantzen, 2004). Essas modificações no ambiente aquático resultam em alterações da paisagem, e também, nas complexas relações inter e intraespecíficas existentes na biota aquática (Claro JR et al., 2004; Freitas et al., 2014), o que provavelmente contribui para os padrões de espectro de tamanho encontrados.

Embora nossos resultados tenham revelado declínios na abundância e distribuição de tamanho das espécies do lago Catalão esse padrão se mantém estável e consistente interanualmente, não podemos relacionar esse declínio às variações da cota e intensidade de seca. Apesar de sabermos que mudanças na inclinação do espectro de tamanho são esperadas em resposta a mudanças ambientais que afetam consistentemente as interações entre as classes de tamanho, os efeitos são combinados com o tamanho por exemplo, em resposta à temperatura, crescimento ou eficiência de consumo, entre as classes de tamanho (Treblico et al., 2013). Tais variações no padrão sazonal possivelmente influenciam a composição de espécies e estrutura da comunidade em ambientes de várzea como relatado por Freitas et al. (2013) e Röpke et al. (2017), que observaram impactos negativos ligados principalmente aos eventos de seca extrema sobre as assembleias de peixes. Os mesmos autores sugerem mudanças na estrutura trófica das assembleias locais após a seca de 2005, sendo que as mudanças encontradas por Röpke et al. (2017) são dependentes do porte da espécie, com contribuição relativa maior de espécies de pequeno porte. Vale ressaltar que existem diferenças na forma de considerar o tamanho das espécies no presente estudo e nos acima citados, sendo que aqui o agrupamento dos indivíduos foi baseado no tamanho no momento da captura, e não o tamanho como um atributo de porte máximo da espécie. Apesar destas diferenças, ao menos em parte, os artigos corroboram a redução de abundância geral observada ao longo do tempo para esta porção da bacia amazônica.

Um ponto importante que não podemos deixar de considerar na discussão deste trabalho é que o fator seca possivelmente não esteja influenciado o SS do Catalão também em virtude de sua localização (confluência de dois importantes rios Solimões e Negro) e, conseqüentemente, de suas características físicas. Sabemos que no ambiente de várzea os lagos não ficam completamente isolados salvo alguns períodos de seca mais intensa, e o lago Catalão passa a maior parte do ciclo hidrológico conectado com o rio. Em períodos de cheia essa conectividade é ampliada e pode se dar também via igapó (floresta

inundada), o que contribui para o aporte de nutrientes ao sistema e também proporciona a entrada de novos indivíduos, permitindo uma rápida recolonização. Alguns trabalhos como o de Leite et al. (2006), Araújo-Lima (1984), e de Junk et al. (1989) corroboram essa hipótese, onde esses autores relatam a entrada de larvas e juvenis no sistema Catalão provenientes da calha principal do rio. Desta forma, não seria arbitrário considerar que essa recolonização que ocorre funcione como um efeito diluidor do efeito das secas sobre o espectro de tamanho dessa assembleia especificamente.

Embora o lago estudado não seja alvo da pesca comercial, esta porção da bacia tem sido afetada historicamente pela pesca em pequena escala (Castello et al., 2013; Lopes et al., 2016). Isso pode ser corroborado por alguns trabalhos baseados em diferentes conjuntos de dados que evidenciaram a sobrepesca de espécies como *Semaprochilodus* spp. (Ribeiro & Petrere, 1990), e *Prochilodus nigricans* (Catarino et al., 2019). Especificamente para nossa área de estudo e período considerado, a ausência de dados de desembarque pesqueiro concordantes com nossa série temporal limita qualquer análise direta desse efeito. Em relação à série temporal usada neste estudo, acreditamos que os efeitos observados no espectro de tamanho da comunidade seriam mais relacionados aos eventos ambientais recentes relativos ao pulso de inundação, do que com o histórico de pesca pela grande quantidade de espécies sem relevância pesqueira nessa assembleia de peixes (Röpke et al. 2021). Porém, esses fatores são difíceis de serem isolados porque a seca reduz a área superficial do lago (Frappart et al., 2012), aumentando a vulnerabilidade de captura dos peixes (Souza et al 2017). Deste modo, se o efeito da seca sobre o espectro de tamanho não foi detectado, seria pouco provável a detecção do efeito da pesca, a menos que uma série de dados maior, incluindo período prévio a 1999 fosse adicionada. Visto que segundo Piet e Jennings (2005) as métricas baseadas em tamanho podem não ser tão eficazes em escala espacial e temporal pequena, outro ponto importante que devemos considerar são as mudanças baseadas na estrutura da teia alimentar, que podem sofrer alterações marcantes devido à mortalidade seletiva causada pelas artes de pesca utilizadas. Segundo Blanchard (2005), esse efeito é difícil de ser percebido em escalas temporais e espaciais menores porque o ambiente afeta a seletividade da arte de pesca e a dinâmica populacional a curto prazo, embora possam ser confiáveis os efeitos da pesca em escalas maiores.

Nossos resultados mostram uma tendência na redução da abundância com o tamanho e uma potencial acentuação do espectro de tamanho da assembleia geral de peixes no lago.

Consideramos que qualquer tentativa de vincular essas mudanças aos eventos de seca, assumindo uma resposta instantânea ou baseada em atrasos da resposta hidrológica, pode ser considerado grosseiro, apesar de inevitável, dadas as poucas informações sobre respostas biológicas das espécies em função das secas amazônicas. Entretanto, Fabré et al. (2017) relataram variações no tamanho e abundância em decorrência dos eventos de seca na Amazônia, modelando espectro de tamanho em assembleias de peixes explorados pela pesca comercial em três rios da bacia amazônica, baseado em dados de desembarque. Mesmo existindo uma diferença clara nas análises tanto na escala temporal quanto espacial do trabalho aqui apresentado, ficou evidente que o clima/seca teve um efeito direto, porém, não exclusivo, sobre o tamanho na assembleia de peixes nos ambientes e intervalo de tempo estudados por aqueles pesquisadores.

Partindo para uma discussão mais ampla sobre o assunto, podemos citar Carozza et al. (2018) em estudos de simulação de ambientes marinhos, por exemplo, que demonstraram os principais mecanismos que desencadeiam a redução do espectro de tamanho: a sensibilidade à temperatura, mortalidade natural e redução do tamanho de organismos base da cadeia trófica como fitoplâncton, que por sua vez, reduz a energia disponível para os peixes através da transferência trófica, fazendo com que estes tenham o tamanho reduzido. Em linhas gerais, diversos outros trabalhos (Yvon-Durocher et al., 2011; Reuman et al., 2014; Malerba et al., 2018) associam mudanças dos espectros de tamanho a aumento de temperatura, e tais mudanças resultam em produção de indivíduos menores e baixa produção de biomassa, culminando em uma reorganização da estrutura das redes alimentares locais. Trabalho recente de Arranz et al. (2019) encontrou evidências de irregularidades nos espectros de tamanho linear das comunidades de peixes em lagos afetados pela atividade humana (por exemplo, pesca, alteração da margem). Além disso, outros estudos destacam que os eventos de seca enfraquecem as cascatas tróficas e a força das interações biológicas (por exemplo, competição, predação) e de forma desproporcional, ameaçam os principais predadores, muitas vezes resultando em comunidades dominadas por organismos menores (Woodward et al., 2016, Dorn & Cook, 2015). Alguns dos processos relatados podem estar ocorrendo na assembleia de peixes do lago Catalão, mas investigações mais criteriosas devem ser realizadas para que tal afirmação possa ser corroborada. Alguns estudos pretéritos em ambientes amazônicos levantaram hipóteses de haver uma relação entre temperatura e mortalidade natural (Freitas et al., 2012; Barros & Albernaz, 2013; Freitas et al., 2013), enquanto outros

descrevem a redução do tamanho de peixes de riachos amazônicos como resposta ao aumento da temperatura causado pela supressão da mata ciliar (Ilha et al., 2018); porém, nenhum dos trabalhos supracitados utilizou modelos de espectro de tamanho em suas análises.

Ressaltamos que existe uma certa dificuldade para comparar os resultados e conclusões de trabalhos sobre espectro de tamanho, porque a classificação e organização dos dados são feitas de maneiras distintas e isso influencia os resultados obtidos, tornando a comparação dos resultados arriscada. De maneira geral sabemos que a teoria de espectro de tamanho reúne uma série de modelos estatísticos que descrevem os mecanismos de predação baseada em tamanho e restrições fisiológicas (Blanchard et al., 2017; Andersen, 2019), até a teoria de escala simples que resume esses processos por meio da eficiência de transferência energética entre níveis tróficos e razões de massa predador-presa (Brown e Gillooly, 2003; Jennings e Mackinson, 2003) que predizem uma inclinação do espectro de tamanho em até -2. Mesmo na ausência de pesca, muitos processos podem afetar as premissas dos modelos e colaborar para a variação do valor teórico da inclinação do espectro (Trebilco et al., 2016; Eddy et al., 2020). A estabilidade empírica da inclinação do espectro de tamanho em muitos ecossistemas aquáticos pode variar de acordo com as características desses ambientes (Sprules et al., 2016) e a sua sensibilidade aos efeitos de impactos como a pesca ou eventos climáticos (Shin et al. 2005; Petchey e Belgrano, 2010).

Em suma, consideramos que o espectro de tamanho aqui apresentado para a comunidade do lago Catalão constitui uma informação importante, mesmo não tendo revelado uma resposta direta aos eventos de seca intensa e duradoura como esperávamos. Para isso, a continuidade do trabalho de monitoramento do projeto Catalão é fundamental e necessária para que possamos entender ainda mais as nuances do espectro de tamanho em comunidade de várzea e como essa comunidade responde às constantes alterações que vêm ocorrendo principalmente nas últimas décadas.

REFERÊNCIAS

Allison, E.H. et al. Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries. *Fish and Fisheries*, v. 10, n.2, p. 173-196. 2009.

Amadio, S.; Ropke, C. & Neves dos Santos, R. Efeito das modificações ambientais naturais e antrópicas na reprodução de peixes amazônicos. *Ciência Animal*, v. 22, n. 1, p. 188-192. 2012.

Amaral, M. T. & Vale, R. C. S. Biodiversidade e mudanças climáticas: um olhar sobre a Amazônia. *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer*, v. 6, n. 11, p. 1-14. 2010.

Ambrizzi, T. et al. Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. *Relatório 3*. São Paulo: MMA, 2007. 112 p.

Arvey CJ, Tolimieri N, Levin PS. Changes in body size, abundance, and energy allocation in rockfish assemblages of the northeast Pacific. *Ecol Appl*. 2006;16(4):1502-1515. doi:10.1890/1051-0761(2006)016[1502:cibsa]2.0.co;2

Bandeira, K. C. T. Efeitos dos eventos climáticos locais no recurso pesqueiro do tambaqui da Amazônia Central. 2017. 139 f. Tese (Doutorado em Uso sustentável de recursos pesqueiros tropicais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

Barros, D. F. & Albernaz, A. L. M. Possible impacts of climate change on wetlands and its biota in the Brazilian Amazon. *Brazilian Journal of Biology*, v. 74, n. 4, p. 810-820. 2013.

Bayley PB, Castello L, Batista VS, Fabré NN. 2018 Response of *Prochilodus nigricans* to flood pulse variation in the central Amazon. *R. Soc. open sci.* 5: 172232. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.172232>

Bittencourt, M.M. e Amadio, S.A. (2007) Proposta para identificação rápida dos períodos hidrológicos em áreas de várzea do rio Solimões –Amazonas nas proximidades de Manaus. *Acta Amazonica*, 37 (2): 303 –308.

Bojsen, B. H. & Barriga, R. Effects of deforestation on fish community structure in Ecuadorian Amazon streams. *Freshwater Biology*, v. 47, n. 11, p. 2246-2260. 2002.

- Buckley LB, Miller EF, Kingsolver JG (2013) Ectotherm thermal stress and specialization across altitude and latitude. *Integr Comp Biol* 53(4):571–581.
- Castello, L. et al. The vulnerability of Amazon freshwater ecosystems. *Conservation Letters*, v. 6, n. 4, p. 217-229. 2013.
- Cheung, W. W. L. et al. Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems. *Nat. Clim. Change* 3, 254–258 (2013).
- Dalagnol, R. et al. Assessment of climate change impacts on water resources of the Purus Basin in the southwestern Amazon. *Acta Amazonica*, v. 4, n. 3, p. 213-226. 2017.
- Deutsch CA, et al.(2008) Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proc Natl Acad Sci USA* 105(18):6668–6672
- Diamond SE, et al. (2013)Who likes it hot? A global analysis of the climatic, ecological, and evolutionary determinants of warming tolerance in ants. *Glob Change Biol* 18:448–456.
- Dorn, N. J. & Cook, M. I. 2015. Hydrological disturbance diminishes predator control in wetlands. *Ecology* 96, 2984–2993 (2015).
- Ficke, A. D.; Myrick, C. A. & Hansen, L. J. Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, v. 17, p. 581-613. 2007.
- Free, C.M., Thorson, J.T., Pinsky, M.L., Oken, K.L., Wiedenmann, J. and Jensen, O.P. (2019) Impacts of historical warming on marine fisheries production. *Science* 363, 979–983 <https://doi.org/10.1126/science.aau1758>
- Frederico, R. G.; Olden, J. D. & Zuanon, J. Climate change sensitivity of threatened, and largely unprotected, Amazonian fishes. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, v. 26, n.1, p. 91-102. 2016.
- Freitas, C. E. C. et al. The potential impacts of global climatic changes and dams on Amazonian fish and their fisheries. *New Advances and Contributions to Fish Biology*, London: 2013. p. 175-195.
- Freitas, C. E. C, et al. An initial assessment of drought sensitivity in Amazonian fish communities. *Hidrobiologia*, v. 705, p. 159-171. 2012.

Grimm, A. M. & Natori, A. A. Impacts of climate change in South America: mean fields and variability. In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN Hemisphere, 2006, Foz do Iguaçu. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, April 24-28, 2006, INPE., 2006. p. 269-274.

Hirota, M.; Oyama, M. D. & Nobre, C. Concurrent climate impacts of tropical South America land-cover change. *Atmospheric Science Letters*, v. 12, n. 3, p. 261-267. 2011.

Hurd, L.E. et al. Amazon floodplain fish communities: habitat connectivity and conservation in a rapidly deteriorating environment. *Biological Conservation*, v. 195, p. 118-127. 2016.

Instituto Nacional de Meteorologia (*INMET*). «*Normais Climatológicas DO Brasil*». Consultado em 19 de outubro de 2020

Intergovernmental Panel Climate Change (IPCC). Special Report on Emissions Scenarios. Relatório. Cambridge, 2000. 608 p.

Intergovernmental Panel Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Relatório. Cambridge, 2007. 976 p.

IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK).

Jeppesen, E. Climate change already having profound impacts on lakes in Europe. *National geographic*. 2014.

Junk, W.J. & Piedade, M.T.F. (2004) Status of knowledge, ongoing research, and research needs in Amazonian wetlands. *Wetlands Ecology and Management*. 12 (6),597 –609.

Junk, W.J. (ed.) (1997) *The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System*. Ecological Studies. Berlin, Springer Verlag.

Junk, W.J. (1983) Aquatic habitats in Amazonia. *The Environmentalist*. 3,24 –34. Junk, W.J. (1980) Áreas inundáveis –um desafio para a Limnologia. *Acta Amazonica*. 10 (4),775 –795.

Junk, W.J. (1980) Áreas inundáveis –um desafio para a Limnologia. *Acta Amazonica*. 10 (4),775 –795.

Knapp, A. K. et al. Pushing precipitation to the extremes in distributed experiments: recommendations for simulating wet and dry years. *Glob. Change Biol.* 23, 1774–1782 (2016).

Castello L. Peter B. Bayley . FABRE´N.N . BATISTA V. S. 2019. Flooding effects on abundance of an exploited, long-lived fish population in river-floodplains of the Amazon. *Rev Fish Biol Fisheries* <https://doi.org/10.1007/s11160-019-09559-x>

Lima, M. P. Efeitos das mudanças climáticas sobre a expressão gênica e a fisiologia do tambaqui (*Colossoma macropomum*, cuvier, 1818). 2016. 152 f. Tese (Doutorado em genética, Conservação e Biologia Evolutiva) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus.

Lopes, T. M. et al. Two sides of a coin: effects of climate change on the native and non-native distribution of *Colossoma macropomum* in South America. *Plos One*, v. 16, n. 6., p. 1-18. 2017.

Machado, P. L. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química nova*, v. 28, n. 2, p. 329-334. 2005.

Marengo, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA, 2006. 201p.

Marengo, J. A. & Valverde, M. C. Caracterização do clima no século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência*, v.8, p.5-28. 2007.

Marengo, J. A. Água e mudanças climáticas. *Estudos avançados*, v. 22, n. 63, p. 83-96. 2008.

Marengo, J. A. et al. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 5. São Paulo: MMA, 77pp. 2007.

Marengo, J. A. & Dias, P. S. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. In: Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. (Ed.) *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. 3a edição. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados da USP, Academia Brasileira de Ciências, p.63-109. 2006.

Marengo, J. et al. Aquecimento global e mudança climática na Amazônia: retroalimentação, clima-vegetação e impactos nos recursos hídricos. *Amazonia and Global Change, Geophysical Monograph Series*, v. 186, p. 1-24. 2010.

Marengo, J., Borma, L. S., Rodriguez D. A., Pinho P., Soares W. R., Alves L. M., Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation *American Journal of Climate Change*, 2013, 2, 87-96 <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2013.22009>

Marengo, J. A., J. Tomasella, L. Alves, W. Soares and D. A. Rodriguez, “The Drought of 2010 in the Context of Historical Droughts in the Amazon Region,” *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, No. 12, 2011, pp. 1-5. doi:10.1029/2011GL047436

Nobre, C. A. & Nobre, A. D. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. *Estudos avançados*, v. 16, n. 5, p. 81-90. 2002.

Nobre, C.; Assad, E. D. & Oyama, M. D. Mudança ambiental no Brasil: em terra na estufa. *Scientific American*, v. 12, p. 70-75. 2005.

Oberdorff, T. et al. Opinion Paper: How vulnerable are Amazonian freshwater fishes to ongoing climate changes? *Journal Applied Ichthyology*, v. 31, n. 4, p. 4-9. 2015.

Oliveira, A. M. & Val, A. L. Effects of climate scenarios on the growth and physiology of the Amazonian fish tambaqui (*Colossoma macropomum*) (Characiformes: Serrasalminidae). *Hydrobiology*, v. 789, p. 167-178. 2017.

Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R. & Torres, F. J. Fishing down marine food webs. *Science* **279**, 860–863 (1998)

Ramos, M. Biodiversidade e mudanças climáticas: manter a biodiversidade e contribuir para deter o aquecimento global. In: WWF-Brasil, 9a Conferência das Partes da Convenção sobre Diversidade Biológica. Bonn, Alemanha. 2008.

Ramos, M. M. A gestão das pescarias da piramutaba (*Brachyplatystoma vaillantii* - Valenciennes, 1840) no estuário Amazônico, Pará: situação atual e perspectivas. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Política e Gestão Ambiental) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

Ramos, M. M. Os efeitos de alterações ambientais sobre a produção de jaraquis (*Semaprochilodus* spp) desembarcados na cidade de Manaus - AM. 2016. 90 f. Tese

(Doutorado em Ciências Pesqueiras nos Trópicos) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

Ropke, C. P. O papel de mudanças hidrológicas de ordem sazonal e climática na estrutura da assembleia e história de vida de peixes na confluência dos rios Negro e Amazonas. 2016. 159 f. Tese (Doutorado em Biologia de Água Doce e Pesca Interior) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus.

Röpke, C. P. et al. Simultaneous abrupt shifts in hydrology and fish assemblage structure in a floodplain lake in the central Amazon. *Scientific Reports*, v. 7, n. 40170, p. 1-10. 2017

Shin, Y., Rochet, M., Jennings, S., Field, J., Gislason, H., 2005. Using size-based indicators to evaluate the ecosystem effects of fishing. *ICES J. Mar. Sci.* 62, 384–396, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.01.004>

Sioli, H. (1985) *Amazônia, fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais*. Petrópolis, Ed. Vozes

Val, A. L. & Almeida-Val, V. M. Mudanças climáticas e biodiversidade na Amazônia. In: 60a REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA (SBPC), Conferência biodiversidade na Amazônia x mudanças climáticas: causas e consequências, Campinas: SP, 2008.

Val, A. L. As mudanças climáticas e os peixes de água doce. In: 63a REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA (SBPC), Goiânia: GO, 2011.

Wiens JJ (2016) Climate-Related Local Extinctions Are Already Widespread among Plant and Animal Species. *PLOS BIOL* 14(12): e2001104. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2001104>

Woodward, G.; Perkins, D. M.; Brown, L. E. Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Phil. Trans. R. Soc. B.* v. 365, p. 2093-2106. 2010.

Woodward, G. et al. The effects of climatic fluctuations and extreme events on running water ecosystems. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, v. 371, n. 20150274, p. 1-15. 2016.

Van Rijn I, Buba Y, DeLong J, Kiflawi M, Belmaker J. Large but uneven reduction in fish size across species in relation to changing sea temperatures. *Glob Chang Biol.* 2017;23(9):3667-3674. doi:10.1111/gcb.13688

Zuanon, J.(2008) Peixes, pesca e clima na Amazônia: um ensaio sobre os efeitos das mudanças climáticas globais sobre os recursos pesqueiros na região do Rio Negro, Amazonas, Brasil. In: CRUZ, G. V. P.; Andrade, S. (Org.). Rio Negro, Manaus e as mudanças no clima. São Paulo: Instituto Socioambienta

SINTESE

O tamanho é um atributo do indivíduo que ao longo dos anos vem sendo estudado através das mais diversas formas, com o intuito de trazer informações tanto a nível espécie específico quanto a nível de organização ecossistêmica.

A redução do tamanho em resposta a alterações climáticas tem sido relatada ao longo das últimas décadas em diferentes ecossistemas, em todo o globo. Usando uma série histórica de 20 anos, de coletas mensais realizadas em um lago de várzea na Amazônia na confluência dos rios Solimões e Negro, testamos a relação entre a variação das médias dos tamanhos máximos das 11 espécies mais frequentes no tempo em função da posição trófica, vagilidade, uso de pela pesca e eventos hidroclimáticos. Para tal, foram utilizados dois modelos múltiplos lineares, um deles considerando as diferenças interespecíficas na ponderação do efeito das variáveis sobre a média global modelo. Foi possível detectar a existência de uma relação positiva entre a posição trófica e o tamanho quando as diferenças interespecíficas são desprezadas e negativa significativa entre o tamanho e os eventos hidroclimáticos quando é ponderada a diferença de porte entre as espécies.

Tais observações estão em consonância com diversos estudos realizados nos mais distintos ambientes. Por exemplo a relação positiva entre o tamanho e categoria trófica foi observada em ecossistemas terrestre e aquáticos, corroborando a teoria proposta por Elton 1927 que organismos maiores se alimentam de organismos menores. Além disso a relação negativa entre os eventos hidroclimáticos tem sido observada em ambientes diversos, que vão desde organismos marinhos, passando por espécies terrestre e organismos aquáticos continentais. Tais estudo demonstram que alterações no clima tem influenciado de forma significativa a dinâmica e organização dos ambientes em todo o globo.

Dentre as distintas formas de analisar o tamanho e sua relação com o ambiente os modelos de espectro de tamanho vêm sendo utilizado para compreender os efeitos dos distúrbios ambientais nos diversos ecossistemas, desde trabalho seminal de Sheldon 1967. No nosso caso utilizamos o modelo clássico proposto por ele para verificar se alterações nos padrões de hidrológicos de secas, estão contribuindo para a redução do espectro de tamanho dos peixes. Supúnhamos que o aumento da frequência de secas extremas na Amazônia estivesse contribuído para a redução do espectro de tamanho dos peixes.

Contrariando as nossas expectativas os eventos de seca não influenciaram o espectro de tamanho dos peixes de forma negativa embora nossos resultados tenham revelado declínios na abundância e distribuição de tamanho das espécies do lago Catalão, não podemos relacionar esse declínio às variações da cota e intensidade de seca. Uma vez que essa redução não teve relação significativa com a seca, o que nos levou a crer que o uso exclusivo de uma variável ambiental é insuficiente para prever padrões na Amazônia em um curto período de tempo.