

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de **27/09/2026**.

Variação Sazonal na Tolerância Térmica de Peixes de Riachos de Águas Pretas da Bacia do Rio Itanhaém (SP)

Guilherme Ramos Panizza

**SÃO VICENTE - SP
2024**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Biociências
Câmpus do Litoral Paulista



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"

INSTITUTO DE BIOCIÊNCIAS
CÂMPUS DO LITORAL
PAULISTA

Variação Sazonal na Tolerância Térmica de Peixes de
Riachos de Águas Pretas da Bacia do Rio Itanhaém (SP)

Mestrando: Guilherme Ramos Panizza
Orientador: Rafael Mendonça Duarte

Dissertação apresentada ao Instituto de
Biociências, Câmpus do Litoral Paulista,
UNESP, para obtenção do título de Mestre no
Programa de Pós-Graduação em
Biodiversidade de Ambientes Costeiros.

SÃO VICENTE - SP
2024

P193v

Panizza, Guilherme Ramos

Varição Sazonal na Tolerância Térmica de Peixes de Riachos de
Águas Pretas da Bacia do Rio Itanhaém (SP) / Guilherme Ramos

Panizza. -- São Vicente, 2024

65 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Biociências, São Vicente

Orientador: Rafael Mendonça Duarte

1. CTMáx. 2. Aquecimento global. 3. Plasticidade térmica. 4.
Ecofisiologia. 5. Peixes tropicais. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Rafael Mendonça Duarte, por todo o seu apoio durante estes sete anos juntos, e por ele sempre ter estado comigo em todos os momentos e fases, sempre me apoiando e orientando, abrindo portas e laboratórios. Por toda a sua paciência, talvez sua maior virtude, sua inteligência e visão clareadora que sempre transformaram meus conhecimentos e dados. Obrigado por tudo, e principalmente por ter me ajudado a realizar o sonho de trabalhar no campo, sentindo um pouco o doce gosto da ecofisiologia e conservação, que saltam em meu coração e mente...

A Deus e à Natureza, por toda a inspiração que sempre trouxeram em meu coração, por permitir eu realizar meu trabalho, e pelas vidas dos organismos que colocaram em minhas mãos, que desejo sempre honrar e proteger, dedicando parte do meu trabalho e vida à conservação das espécies e de seus habitats. AUM!

Ao meu laboratório, LECTA, do qual me orgulho muito, por ter me acolhido. Agradeço infinitamente por poder ter vivido o crescimento deste laboratório desde praticamente seu início, até o ponto atual, onde possuí equipamentos de ponta, nos permitindo fazer pesquisas exemplares, inclusive na vanguarda e fronteiras do conhecimento acadêmico.

À minha família, por todo o apoio, carinho e incentivo, encorajando-me a seguir o meu sonho, que tenho desde criança, de ser um cientista.

À minha namorada, Carolina, por também sempre me apoiar, ajudando em tudo que é possível, inclusive escrever inúmeras etiquetas para meus tubos falcon e “ependorfs”!

Aos meus grandes amigos, Fernando e Fernanda, Leo, e Thomas, por trazerem momentos de alívios e risadas, além de sempre estarem ali quando precisei de ajuda!

Ao Tuca, Jane e todos que nos ajudaram a realizar o campo em Itanhaém.

Ao IEAMar, pela bolsa técnica em meu primeiro ano de mestrado, essencial para minha permanência.

À CAPES, pela bolsa fornecida a partir de meu segundo no ano mestrado, também essencial para minha permanência.

À Nutricon ©, pelo fornecimento de rações, utilizadas na manutenção dos animais em laboratório.

A todos os professores, laboratórios e colegas que me ajudaram, ensinaram e incentivaram, a pós-graduação foi um divisor de águas na minha vida e na minha percepção do que é, e como fazer ciência de qualidade.

Por fim, a Unesp IB-CLP, meu berço científico, muito obrigado pelas oportunidades!

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados ambientais, obtidos através de sonda multiparâmetro (Horiba-U50) e data logger (Hobo). Dados expressos como média \pm erro padrão (exceto para temperatura, expressos como média e variação mínima e máxima).

Tabela 2. Pesos (g) das três espécies considerando as quatro estações, nos quatro pontos de coleta. Dados expressos como média \pm erro padrão.

Tabela 3. Valores de ARR para as três espécies, dentro dos pontos de coleta e durante as 4 estações do ano

Tabela 4. Valores de %CV para as três espécies, dentro dos pontos de coleta e durante as 4 estações do ano

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem demonstrando as diferentes estratégias térmicas presentes no reino animal (Buffenstein et al., 2022)

Figura 2. Curva de performance térmica hipotética, demonstrando o efeito da temperatura sobre a performance dos organismos (Schulte et al., 2011).

Figura 3. Curva de performance térmica hipotética associada a OCLTT, demonstrando o efeito da temperatura sobre a performance dos organismos (Pörtner, 2010).

Fig. 4: fotos ilustrativas das espécies estudadas neste trabalho: *Hyphessobrycon reticulatus* (A), *Phalloceros reisi* (B), e *Scleromystax barbatus* (C).

Figura 5. Foto demonstrando a camuflagem disruptiva de um exemplar de *Scleromystax barbatus*. Retirado de Gonçalves e Cestari, 2013a.

Figura 6. Mapa hidrográfico da planície costeira da bacia do Rio Itanhaém (Itanhaém/SP), identificando os quatro pontos de coleta e o Rio Panema.

Figura 7. Fotos da margem esquerda (A) e direita (B) do Ponto 1 (P1)

Figura 8. Fotos do Ponto 2 (P2), mostrando a porção mais próxima à estrada (C), e mais adentro do riacho (A e B)

Figura 9. Fotos do Ponto 3 (P3), evidenciando a pequena lagoa (A), um canal de drenagem (B) que cruza a estrada, e a porção do riacho que corre dentro do fragmento florestal (C).

Figura 10. Fotos do Ponto 4 (P4), em A e B a poça formada pela vala de drenagem, em C uma casa e bar que fica ao lado, e em D o canal de drenagem e a estrada que beira o local

Figura 11. Métodos de coleta e petrechos de pesca utilizados durante as coletas e experimentos em campo.

Figura 12. Demonstração da estrutura experimental *in situ*, mostrando os equipamentos utilizados e onde os animais eram dispostos para realização do CTM_{ax}.

Figura 13. Caixa experimental montado em laboratório, para realizar o CTM_{ax} pós-aclimatação a evento de HW.

Figura 14. Variação da temperatura dos quatro pontos, conforme as estações do ano.

Figura 15. Valores da temperatura crítica máxima (CTM_{ax}) das espécies *H. reticulatus* (A), *P. reisi* (B) e *S. barbatus* (C) obtidos em 4 pontos da micro bacia do Rio Preto ao longo das 4 estações do ano. Letras iguais representam que não há diferenças significativas; letras diferentes, demonstram diferenças significativas entre os tratamentos. Letras maiúsculas indicam diferenças entre os pontos em cada estação, e minúsculas entre as estações em cada ponto.

Figura 16. Gráfico dos resultados de testes ANOVA de 2 fatores (estações e pontos), para TSM das espécies *H. reticulatus* (A), *P. reisi* (B) e *S. barbatus* (C). Letras iguais representam que não há diferenças significativas; letras diferentes, demonstram diferenças significativas entre os tratamentos. Letras maiúsculas indicam relações entre os pontos em cada estação, e minúsculas entre as estações em cada ponto.

Fig. 17: Gráficos comparando valores de CTM_{ax} e TSM de *H. reticulatus* e *P. reisi* nas quatro estações, dentro de P2 com os valores de CTM_{ax} e TSM obtidos pela HW em laboratório. Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos em cada espécie.

SUMÁRIO:

1. INTRODUÇÃO:	12
1.1 Temperatura e aquecimento global	12
1.2 - Estratégia térmica.....	13
1.3 - Tolerância térmica	15
1.3.1 – Temperatura crítica máxima (CTM _{ax})	16
1.3.2 – Margem de segurança térmica (TSM)	17
1.3.3 – Índice de aclimação térmica (ARR) e Coeficiente de variação intraespecífico (%CV)	18
1.4 – Riachos costeiros da Mata Atlântica e Ictiofauna	19
1.4.1 – As águas pretas	19
1.4.2 –Ictiofauna	20
2. OBJETIVOS.....	24
2.1 Objetivos gerais.....	24
2.2 Objetivos específicos.....	24
3. MATERIAL & MÉTODOS.....	25
3.1 – Área de estudo	25
3.2 – Coleta de animais e experimentos	25
3.3 – Procedimentos Experimentais	32
3.3.1 – CTM _{ax} em campo.....	32
3.3.2 – CTM _{ax} em laboratório (simulação <i>heatwaves</i>)	33
3.4 – Técnicas Analíticas e Cálculos.....	34
3.4.1 – CTM _{ax} , TSM e ARR.....	34
3.4.2 – Coeficiente de variação intraespecífico	35
3.4.3 – Íons.....	35
3.5. Análise estatística.....	35
4. RESULTADOS:.....	36
4.1. Parâmetros ambientais e biometria	36
4.2 – Temperatura crítica máxima (CTM _{ax})	39
4.2 – Margem de segurança térmica (TSM).....	42
4.3 – Capacidade de aclimação térmica (ARR) e %CV	44
4.4 – Estações vs. <i>Heatwave</i>	45
5 – DISCUSSÃO	46

6. CONCLUSÕES.....	56
7. REFERÊNCIAS.....	57

Resumo

A temperatura é um dos principais fatores abióticos determinantes à performance dos organismos, interferindo diretamente em fatores como metabolismo, tolerância térmica, distribuição, desenvolvimento e abundância de espécies. O aumento da temperatura das águas, causado pelas alterações climáticas globais, pode colocar as espécies em risco, principalmente as ectotérmicas com baixa tolerância e plasticidade térmica. Junto às alterações climáticas globais, a urbanização e o desmatamento de áreas costeiras, como da Mata Atlântica, têm colocado em risco áreas ainda preservadas, muitas com espécies endêmicas. Inserido neste bioma, está a bacia do Rio Itanhaém (SP/Brasil) que apresenta ecossistemas de águas pretas, com alto número de espécies endêmicas. Os estudos em campo investigando efeitos da temperatura são escassos, embora possuam um importante valor para o entendimento das respostas ecofisiológicas e conservação das espécies. Com isso, este estudo avaliou o efeito da variação anual da temperatura da água na tolerância térmica máxima (CTM_{áx}) de peixes de riachos de águas pretas da bacia do Rio Itanhaém, verificando a margem de tolerância térmica (TSM), a taxa de resposta de aclimação (*acclimation response ratio* – ARR) e a variação intraespecífica da tolerância térmica de três espécies de peixes presentes em 4 riachos de águas pretas da micro bacia do Rio Preto, um dos principais corpos d'água da bacia. Além disso, foi verificado o efeito do regime térmico anual natural, e de uma simulação de *heatwave*, na tolerância térmica de duas espécies em um dos pontos amostrados. O CTM_{áx} e a TSM foram significativamente influenciados pela variação térmica anual ($P < 0.001$), e pelos diferentes pontos ($P < 0.001$) e estações, para as três espécies analisadas, onde maiores valores de CTM_{áx} foram observados na Primavera e Verão. *S. barbatus* foi a espécie mais sensível, com os menores valores de CTM_{áx} e TSM, em todas as estações, enquanto *P. reisi* apresentou os maiores CTM_{áx} e TSM em todas as condições, com os maiores limites térmicos. O maior valor de ARR em cada ponto foi de 0,46 em P1 para *P. reisi*; 0,61 em P2 e 0,89 em P3 para *S. barbatus*; e 0,88 e, P4 para *H. reticulatus*, o qual apresentou a maior média anual, possuindo maiores chances de adaptação a regimes mais quentes dentre as três espécies. O menor e o maior valor de %CV foi 0,6 em P1 no Outono, para *H. reticulatus*, e 7,2 em P3 no Outono para *P. reisi*. Tais dados são importantes para determinar o nível de plasticidade térmica e fenotípica das espécies de peixes da região, determinando o grau de sensibilidade térmica das espécies, e o risco frente ao aquecimento global e alterações no uso da terra, facilitando medidas de conservação nestes locais.

Palavras chave: CTM_{áx}; Aquecimento global; Plasticidade térmica; Ecofisiologia; Peixes tropicais

Abstract

Temperature is one of the main abiotic factors affecting the performance of organisms, directly interfering in factors such as metabolism, thermal tolerance, distribution, development and abundance of species. The increase in water temperature promoted by global climate change could lead species to extinction risk, especially the ectotherms with low thermal tolerance and plasticity. Along with global climate change, urbanization and the deforestation of coastal areas, such as the Atlantic Rainforest, have endangered areas that are still preserved, many with endemic species. Within this biome is the Itanhaém River basin (SP/Brazil), which has black water ecosystems with a high number of endemic species. Field studies investigating the effects of temperature are scarce, although they have an important value for understanding the ecophysiological responses and conservation of species. With this in mind, this study evaluated the effect of annual variation in water temperature on the maximum thermal tolerance (CTMax) of fish from blackwater streams in the Itanhaém River basin, verifying the thermal tolerance margin (TSM), the *acclimation response ratio* – ARR and the intraspecific variation in thermal tolerance of three species of fish found in 4 blackwater streams in the Rio Preto micro-basin, one of the main bodies of water in the basin. In addition, the effect of the natural annual thermal regime and a heatwave simulation on the thermal tolerance of two species at one of the sampling points was verified. CTMax and TSM were significantly influenced by the annual thermal variation ($P < 0.001$), and by the different points ($P < 0.001$) and seasons, for the three species analyzed, where higher CTMax values were observed in spring and summer. *S. barbatus* was the most sensitive species, with the lowest CTMax and TSM values in all seasons, while *P. reisi* showed the highest CTMax and TSM in all conditions, with the highest thermal limits. The highest ARR value at each point was 0.46 at P1 for *P. reisi*; 0.61 at P2 and 0.89 at P3 for *S. barbatus*; and 0.88 at P4 for *H. reticulatus* which had the highest annual average, giving it the best chance of adapting to warmer regimes of the three species. The lowest and highest %CV values were 0.6 at P1 in the fall for *H. reticulatus* and 7.2 at P3 in the fall for *P. reisi*. These data are important for determining the level of thermal and phenotypic plasticity of fish species in the region, determining the degree of thermal sensitivity of the species, and the risk in the face of global warming and changes in land use, facilitating conservation measures in these locations.

Key words: CTMax; Global warming; Thermal plasticity; Ecophysiology; Tropical fishes

1. INTRODUÇÃO:

1.1 Temperatura e aquecimento global

As alterações climáticas, como o aquecimento global, representam um alto risco para o equilíbrio ambiental regional e mundial, uma vez que a temperatura é um dos fatores abióticos de maior influência na complexidade e estabilidade dos ecossistemas, afetando diretamente diferentes níveis da organização biológica, desde o nível micro (moléculas) ao macro (ecossistemas) (Hochachka & Somero, 2002). Existem previsões de que essas mudanças podem resultar em um aquecimento das águas de 3 a 5°C até o final do século em cenários mais extremos (IPCC, 2014), sendo que, desde a revolução industrial, já houve um aumento de cerca de 1,2°C na temperatura média global (IPCC, 2018). O relatório mais atual do IPCC cita que mesmo com os acordos atuais até 2030 este acréscimo ocorrerá, e que até o fim do século será muito improvável que a temperatura não esteja 2°C mais elevada que atualmente (IPCC, 2023). A ocorrência de regimes térmicos extremos dependerá das medidas ambientais atuais e futuras, principalmente acerca do desmatamento e emissão de gases de efeito estufa. Caso sigamos com os atuais acordos e conjunturas, há 66% de chance de um aumento de 3,2°C ocorrer nas águas até 2100, no qual cerca de 30% das espécies de água doce podem ter sua distribuição alterada (Barbarossa et al., 2021).

Barbarossa e colaboradores (2021), também citam que alguns sistemas aquáticos mais estáveis, ou com maior estratificação térmica, podem servir de refúgio térmico às espécies; porém, isso não se aplica para habitats como pequenos córregos e riachos, uma vez que estes são, em geral, rasos e estreitos impedindo que haja uma estratificação térmica significativa, principalmente nas áreas já desmatadas (sem sombreamento). Há locais onde já foram comprovadas mudanças no regime térmico nos últimos tempos, levando a modificações na distribuição das espécies em rios (Comte & Olden, 2017; Hochachka & Somero, 2002; Jackson & Mandrak, 2002; Mendonça et al., 2005), ou até mesmo extinção em certos locais, no caso de organismos mais sensíveis a variações térmicas (Lynch et al., 2016).

O alto e crescente grau de urbanização e emissões de carbono, de forma global, segue como um dos principais responsáveis pelo desequilíbrio e deterioração da qualidade das reservas naturais (Camargo et al., 1996; Lapointe et al., 2018). Isso pode afetar direta e indiretamente a ecologia, distribuição e resiliência das espécies presentes na natureza (Ferreira

et al., 2014; C. da S. Gonçalves et al., 2016) . Junto a isso, o elevado e crescente grau de urbanização, agricultura e desmatamento das matas ciliares podem alterar a estabilidade dos bancos laterais dos riachos, influenciando diretamente a distribuição das espécies presentes (Cetra et al., 2012; Ferreira et al., 2014).

Modificações no uso da terra em áreas de drenagem de rios e riachos, como ocorrido na bacia do Rio Itanhaém (São Paulo, Brasil) (Ferreira & Petrere, 2009), têm grande potencial para alterar significativamente a incidência de luz, produtividade primária e a temperatura dos corpos d'água, o que tende a facilitar o aquecimento de 3 a 5 °C (menos áreas abrigadas e sombreadas) (Turko et al., 2020), principalmente nos riachos, por possuírem um volume menor de água, com profundidades às vezes menores de 1 m. Tal como visto para outros ecossistemas lênticos, esses fatores podem levar a alterações drásticas na estrutura e a composição das comunidades aquáticas presentes nestes ecossistemas (Bojsen & Barriga, 2002).

Nesse contexto de mudanças nas temperaturas globais, estudos sugerem que animais da região Tropical correm mais riscos frente ao aquecimento global por viverem em regimes térmicos mais próximos de seus limites máximos (C. Madeira et al., 2017; Vinagre et al., 2016), além de não experimentarem variações térmicas sazonais significativas, comparados aos ambientes de região temperada, refletindo em menor plasticidade fenotípica que pode prejudicar seu potencial de aclimação à novos regimes térmicos (McDonnell & Chapman, 2015). Assim, os organismos presentes nos ambientes aquáticos tropicais podem sofrer mais danos em função de alterações nos parâmetros ambientais, dependendo fortemente de sua história de vida (Barrett et al., 2011), plasticidade fenotípica (Leclair et al., 2020) padrão de distribuição e resiliência (Gale et al., 2011). Além da distribuição geográfica, fatores como a abundância de espécies também são comumente influenciados pelos regimes térmicos (Schulte et al., 2011).

1.2 - Estratégia térmica

A temperatura interfere diretamente no metabolismo e homeostase dos organismos (Hochachka & Somero, 2002), principalmente dos ectotérmicos (Fig. 1), tal como a maioria dos peixes (Angilleta Jr., 2009; Islam et al., 2020). Estes organismos não possuem a capacidade de regular metabolicamente sua temperatura corporal (T_c) (Sarma et al., 2010), sendo a T_c

controlada pela temperatura do ambiente (T_a), o que determina o grau de desempenho ótimo das funções fisiológicas e bioquímicas do animal (D. Madeira, Narciso, Cabral, & Vinagre, 2012). Existem vantagens e desvantagens em cada estratégia térmica, em diversos níveis, como no metabolismo, forrageamento e predação (Wegner et al., 2015a). Por exemplo, na endotermia vista em aves e mamíferos, estratégia na qual o organismo produz metabolicamente calor, sua T_c não varia conforme a T_a , possibilitando maior eficiência enzimática, pois estas atuam próximos às suas temperaturas ótimas, o que permite maior independência em relação ao regime térmico ambiental. Por outro lado, isso tem um custo elevado, já que manter a T_c diferente de T_a é extremamente custoso metabolicamente. Em contrapartida, os ectotérmicos por não regularem sua T_c gastam menos energia com seu metabolismo, mas necessitam muitas vezes de enzimas específicas para cada faixa de temperatura, para que os sistemas fisiológicos mantenham o seu funcionamento conforme a T_a varie, o que gera custos adicionais para a manutenção (Bícego & Gargaglioni, 2020). Basicamente, quando comparamos animais ectotérmicos e endotérmicos de tamanhos e massas semelhantes, a taxa metabólica basal do segundo será muito mais elevado indicando um maior custo metabólico para a manutenção da T_c .

Dentro das estratégias térmicas, ainda existem a pecilotermia, na qual a temperatura do organismo varia conforme T_a , e a homeotermia, em que T_c se mantém constante independente de T_a (Fig.1). Contudo, para alguns organismos, as estratégias térmicas (ectotermia, endotermia, pecilotermia e homeotermia) podem se sobrepor, como em répteis (“sangue frio”) que quando ativos, apresentam temperaturas elevadas, e o oposto em mamíferos (“sangue quente”) que hibernam ou entram em torpor, onde sua temperatura pode chegar a menos de 0°C (Bícego & Gargaglioni, 2020). Os autores citam que este último caso pode ocorrer em algumas aves e mamíferos, os quais são atualmente classificados como heterotérmicos, uma vez que, apesar de comumente regularem sua T_c , durante eventos de torpor/hibernação ficam equilibrados ou muito próximos da T_a . Outro exemplo de heterotermia, denominada endotermia local, ocorre em grandes peixes marinhos (e. g atum e marlim), nos quais algumas porções do corpo, como musculatura esquelética (atum), apresentam uma temperatura mais elevada que a da água, o que pode favorecer metabolismo celular local, ou organismal (Wegner et al., 2015b).

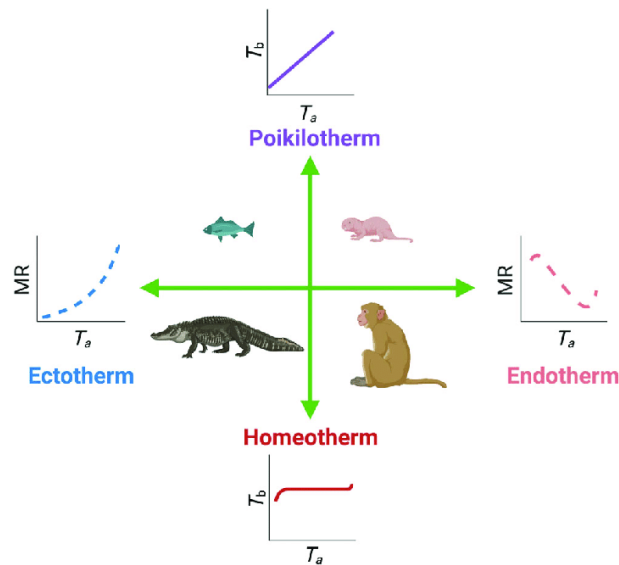


Figura 1: Imagem demonstrando as diferentes estratégias térmicas presentes no reino animal (Buffenstein et al., 2022). Note que nos ectotérmicos a taxa metabólica basal (MR) aumenta exponencialmente com a temperatura ambiental (T_a).

De modo semelhante ao que ocorre com os corpos d'água, organismos com grande volume/massa corporal, podem “manter” suas temperaturas mais estáveis, mesmo a T_a variando consideravelmente em dias de inverno (Bícego & Gargaglioni, 2020), fazendo com que o animal se comporte como um ectotérmico-homeotérmico (Fig.1). Isso traz à tona algumas preocupações já que espécies miniaturizadas e de massa diminuta, tal qual os peixes de riachos, podem ser mais suscetíveis ao estresse térmico, onde a rápida variação da T_a levaria a uma abrupta elevação da T_c .

1.3 - Tolerância térmica

Nesse contexto, a tolerância térmica denota a capacidade dos organismos em ajustar suas funções fisiológicas e bioquímicas (tais como velocidade enzimática, ventilação, batimentos cardíacos e natação, entre outros), ou mantê-las conforme é exposto a diferentes temperaturas. Assim, limite térmico seria o ponto no qual o animal não é mais capaz de realizar certas funções fisiológicas de forma eficiente, e começa um declínio em sua performance, até um ponto onde cessa completamente suas atividades (Ern et al., 2016). A curva de performance térmica (*thermal performance curve*) determina o nível de desempenho dos organismos conforme a variação da temperatura, estabelecendo limites mínimos e máximos para o

funcionamento de suas funções vitais (McKenzie et al., 2021; Schulte et al., 2011) (Fig. 2).

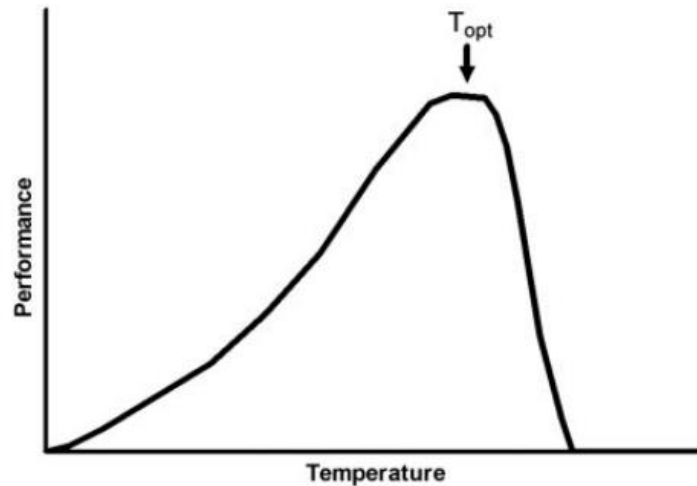


Figura 2. Curva de performance térmica hipotética, demonstrando o efeito da temperatura sobre a performance dos organismos (Schulte et al., 2011).

1.3.1 – Temperatura crítica máxima (CTM _{MÁX})

Nesse contexto, as metodologias de temperatura crítica (*critical thermal method* – CTM) são extremamente úteis e importantes para verificar a tolerância térmica das espécies, além de permitir simulações de exposições a novos eventos climáticos, como os aumentos de temperatura previstos até o fim do século (Roni et al., 2019), e como isso afeta o desempenho do animal no teste de estresse térmico (e. g., seu comportamento no teste e sua temperatura crítica). Basicamente, esses testes de estresse são realizados expondo os organismos a uma taxa de acréscimo ou decréscimo de temperatura, até que o mesmo atinja o *end-point* escolhido (Ern et al., 2020; Lefevre et al., 2021; Zhou et al., 2019), sendo a perda de equilíbrio (*loss of equilibrium* – LOE) o mais utilizado (Campos et al., 2019; Hernández-Sandoval et al., 2018; Loeschcke & Hoffmann, 2007; Vinagre et al., 2015).

O espectro entre a temperatura crítica mínima (CTM _{MÍN}) e a temperatura crítica máxima (CTM _{MÁX}) determina a janela de performance térmica (*performance window*) (McDonnell & Chapman, 2015). Também conhecida como nicho térmico, esta janela dita o gradiente e os limites de tolerância térmica para o desenvolvimento normal da espécie e o *fitness* aumentado no ambiente, possibilitando desenvolver e perpetuar sem riscos relativos a estresses térmicos

(D. Madeira, Narciso, Cabral, & Vinagre, 2012; Zhou et al., 2019). O nicho térmico tem íntima relação com as condições de temperatura que o organismo experiencia sem eu ambiente, como durante estações do ano, e sua capacidade de lidar com essas mudanças está diretamente relacionada a sua plasticidade térmica e fenotípica (Pörtner, 2010). O regime térmico (e.g., temperatura de aclimatação, aclimatização e sazonalidade) no qual o organismos é exposto tem marcada relação com seus valores de tolerância e limites térmicos (Butler, 2024; Lamptey et al., 2022; Somero, 2010), com limites definidos pelo CTMín e CTMáx.

Por meio dos testes de CTMáx, é possível inferir os níveis críticos de estresse fisiológico e comportamental em que o indivíduo tem suas capacidades cognitivas ou locomotoras prejudicadas, a ponto de não conseguir evitar situações que podem levar à sua morte (Ern et al., 2020; Hernández-sandoval et al., 2018), como competição ou predação.

1.3.2 – Margem de segurança térmica (TSM)

Outro fator de vital importância para as espécies ectotérmicas é sua margem de segurança térmica (*thermal safety margin* - TSM), sendo a TSM definida pela aptidão da espécie em responder a mudanças térmicas (e.g. a aclimatação a maiores temperaturas). A TSM é obtida subtraindo os valores da temperatura de aclimatação (ou a T_a média) do CTMáx dos indivíduos. Assim, para manter suas janelas térmicas em regimes térmicos aumentados os organismos precisam ser capazes de elevar seus CTMáx conforme a T_a , o que garante sua performance metabólica e aumenta assim suas chances de sobrevivência. Com isso, estes índices em conjunto (CTMáx e TSM) são fundamentais para investigação da capacidade de aclimatação térmica das espécies (Campos et al., 2019; Kikuchi et al., 2019a; C. Madeira et al., 2017; Stillman, 2003; Sunday et al., 2012; Vinagre et al., 2016, 2019). Assim, as TSM obtidas por meio de testes de CTMáx, realizados em diferentes regimes de aclimatação, podem indicar se o organismo foi capaz de se aclimatar ou não, aos novos regimes térmicos (Cereja, 2020; Leclair et al., 2020) .

Atualmente, a grande maioria dos trabalhos realizados com CTMáx são feitos em laboratório/*ex-situ* (Campos et al., 2018; Kikuchi et al., 2019b; C. Madeira et al., 2017; D. Madeira, Narciso, Cabral, Vinagre, et al., 2012; Vinagre et al., 2018), nos quais os animais são aclimatados a certas temperaturas, geralmente utilizando regimes térmicos estáveis, os quais

não ocorrem no ambiente natural (Schulte et al., 2011). Entretanto, muitas vezes é inviável realizar experimentos em campo, ou a pesquisa não exige/permite que tais variações ocorram, portanto, análises em laboratório são e serão sempre muito importantes. Por outro lado, estudos de respostas fisiológicas, realizando testes com organismos mantidos em seu ambiente, e expostos a seus regimes térmicos naturais (Leclair et al., 2020), podem trazer resultados mais confiáveis e aplicáveis, principalmente para estudos de cunho ecofisiológico e voltados para a conservação de espécies e de seus ecossistemas.

Assim, o uso dos dois tipos de metodologias permite comparações e compreensões sobre a relação entre regimes térmicos ambientais e performance das espécies, e diferenças entre respostas a exposições agudas, durante as ondas de calor (*heatwaves* - HW), e crônicas, como ao longo das estações do ano. Existem algumas classificações para os eventos de ondas de calor sendo, por exemplo, um aumento de até 5°C na temperatura do ar por mais de 5 dias consecutivos (Mameri et al., 2020; Vinagre et al., 2016), porém a mais aceita atualmente é quando a Ta ultrapassa os 90% da média ou temperatura absoluta daquele local comparado aos últimos anos no mesmo período ou dia (Erlat et al., 2021; Faye et al., 2021).

No caso dos eventos agudos, os organismos podem não ter tempo, ou a plasticidade térmica necessária para responder de forma eficiente ao estresse térmico. Enquanto isso, as alterações sazonais naturais na temperatura ambiental podem trazer riscos adicionais para as espécies, uma vez que, em períodos mais quentes (e.g. no verão) algumas espécies já enfrentam regimes térmicos próximos ao seu CTMáx (Leclair et al. 2020). Logo, pode-se concluir que a soma de uma estação ou regime térmico elevado, junto a uma HW, pode ser fatal, como já registrado para peixes de região Tropical (Le et al., 2020; D. Madeira et al., 2020) e Temperada (Westley, 2020), e até mesmo para humanos (Lo et al., 2022).

1.3.3 – Índice de aclimação térmica (ARR) e Coeficiente de variação intraespecífico (%CV)

As respostas das espécies frente à temperatura podem variar conforme a população (Schulte et al., 2011), sendo a variação intraespecífica (Nati et al., 2021) e o coeficiente de variação intraespecífico (C. Madeira et al., 2017) métodos para avaliar potenciais diferenças na plasticidade térmica dos indivíduos. Maior plasticidade pode indicar maior diversidade genética

em uma população (Nati et al., 2021), fornecendo informações sobre o potencial de adaptação térmica das espécies em determinados locais (Anlauf-Dunn et al., 2022). A taxa de aclimação térmica (*acclimation response ratio* – ARR), apesar de simples, fornece dados importantes sobre a capacidade ou magnitude de aclimação de uma espécie, quando exposta a diferentes temperaturas de aclimação (A_T) (Denisse Re et al., 2012; Xia et al., 2017). Ele é obtido ao subtrair os valores de $CTM_{\text{máx}}$ entre duas temperaturas, e dividindo o resultado pela diferença entre as duas A_T (Claussen, 1977). Dessa forma, maiores ARR's indicam que a espécie conseguiu elevar de forma eficaz seus limites máximos de tolerância, frente a um dado aumento de temperatura, enquanto o contrário demonstra pouca capacidade de resposta quando exposta a estes cenários. A segunda condição tende a ser mais preocupante, e indicar baixos níveis de plasticidade térmica, ao menos dentro do intervalo estudado. Os organismos que experienciam maiores variações de temperatura no ambiente tendem a desenvolver maiores ARR's (Bugg et al., 2020) e, geralmente, apresentam maior plasticidade térmica (Bícego & Gargaglioni, 2020; Rahman et al., 2020).

Além das diferenças na tolerância térmica entre espécies e locais, existe também uma variação entre os organismos de um mesmo grupo/população, podendo ser resultante de fatores do habitat e histórico evolutivo da população (Nati et al., 2021). O coeficiente de variação intraespecífico (%CV), obtido através do desvio padrão e média, fornece uma porcentagem do quanto certo fator varia dentro de um grupo (C. Madeira et al., 2017). Essa metodologia aplicada aos valores de $CTM_{\text{máx}}$, pode ser utilizada como mais uma peça para investigar a plasticidade térmica.

1.4 – Riachos costeiros da Mata Atlântica e Ictiofauna

1.4.1 – As águas pretas

Dentro do contexto dos riachos de água doce, a Bacia do Rio Itanhém, situada na região sudeste do Brasil, possui cerca de 954 km², sendo a segunda maior do estado de São Paulo, abrangendo duas áreas metropolitanas, da Grande São Paulo e da Baixada Santista (Ferreira et al. 2014). Os riachos costeiros que compõem a bacia do Rio Itanhém são cercados pelo bioma da Mata Atlântica e apresentam marcadas diferenças limnológicas e na estrutura de seus habitats, favorecendo elevada biodiversidade nestes ecossistemas, sendo divididos

principalmente em cursos de águas claras e pretas.

Estes rios e riachos são distribuídos em diferentes sub-bacias, como a do Rio Preto, que possui afluentes de águas claras e pretas (Ferreira, 2007), sendo que os segundos tem valores de pH entre 3,3 e 5. Outra característica desses ambientes é grande quantidade de matéria orgânica dissolvida (MOD) ricas em substâncias húmicas, presentes em todos os estratos ecossistêmicos (solos, águas e sedimentos), e que são formadas a partir da decomposição de plantas e tecidos animais (Al-Reasi et al., 2011; Gaffney et al., 1996).

Tais substâncias são classificadas em duas categorias, os ácidos fúlvicos e ácidos húmicos, ricos nos riachos de águas pretas (Gaffney et al., 1996). O carbono orgânico dissolvido (COD) é muitas vezes sinônimo do MOD (Holland et al., 2017), o qual é reconhecido por sua importância e eficiência na redução de danos causados por condições ambientais extremas em peixes, como baixo pH, podendo reduzir danos sobre a ionorregulação (Duarte et al., 2016) e excreção de nitrogênio (Duarte et al., 2018). Além de alta concentração de COD e baixo pH as águas pretas geralmente tem baixas concentrações de oxigênio dissolvido, mas alta riqueza e diversidade da ictiofauna (Ferreira and Petrere 2009; Gonçalves and Braga 2013; Gonçalves and Cestari 2013; Ferreira et al. 2014), com diversas espécies endêmicas (Gonçalves and Cestari 2013^a; Gonçalves et al. 2016). Tais atributos, além do fato da Mata Atlântica ser um bioma ameaçado, principalmente pela expansão urbana na planície costeira, faz com que esses ambientes sejam considerados *hotspots* de biodiversidade da ictiofauna para esses ecossistemas de água preta (Myers et al., 2000).

1.4.2 – Ictiofauna

Como descrito acima, os riachos costeiros exibem alto grau de endemismo, sendo considerados *hot-spots* de biodiversidade da ictiofauna (Myers et al., 2000), com espécies ameaçadas de extinção presentes na região sudeste da Mata Atlântica do estado de São Paulo, como o caracídeo *Mimagoniates lateralis* (popularmente conhecido como manjubinha) e o calictídeo *Scleromystax macropterus* (popularmente conhecido como coridora) (Gonçalves et al. 2016; Moraes et al. 2020). Além de fatores como pH e COD, a própria composição dos habitats, como geomorfologia, granulometria do sedimento, velocidade da correnteza e profundidade também afetam as assembleias destes corpos d'água (S. Gonçalves et al., 2012).

O gênero *Hyphessobrycon* (Characiformes) é amplamente distribuído nos ambientes de

água doce, desde o México à Argentina (Dagosta et al., 2016), abrangendo cerca de 130 espécies, incluindo onívoros, carnívoros, herbívoros, oportunistas e até mesmo espécies com hábito alimentar especialista (Santana et al., 2019). A espécie *Hyphessobrycon reticulatus* (Characiformes: Characidae) (Ellis, 1911), popularmente conhecido como Tetra Reticulado (Fig. 4A) ocorre principalmente nos riachos de águas pretas da restinga (também ocorre em águas claras, mas com pouca abundância), com alta abundância nas planícies costeiras da Mata Atlântica (Ferreira, 2007). *H. reticulatus* pode ser encontrado nas águas escuras de Itanhaém e Peruíbe (S. Gonçalves et al., 2013), tendo uma dieta insetívora, com predominância de insetos terrestres, o que reforça a importância da vegetação ripária para a espécie (C. da S. Gonçalves et al., 2018). Quanto à performance térmica, em um estudo feito em laboratório, com espécimes de água preta (Rio Panema – Itanhém/SP), *H. reticulatus* sofreu grande influência da temperatura de aclimação sobre seu CTMáx, com valores de 34,4°C, 35,9°C e 38,2°C, quando aclimatado a 20, 25 e 30°C, respectivamente (Vidal, 2023). A alteração do CTMáx nas três temperaturas de aclimação, com um aumento de 11%, demonstra que a espécie foi capaz de aclimatar-se a regimes térmicos mais elevados.

O poecilídeo *Phalloceros reisi* (Cyprinodontiformes: Poeciliidae) (Lucinda, 2008), também conhecido como Guaru ou Barrigudinho (Fig. 4 B), é uma espécie onívora (Peressin et al., 2018) pertencente ao gênero com maior representantes de sua família na América do Sul (Thomaz et al., 2019), com espécies podendo ser encontradas inclusive em águas salobras (de Souza, 2022; Lucinda, 2008). Os poecilídeos, diferente de muitos outros grupos de peixes, possuem fertilização interna e viviparidade (Pollux et al., 2009), sendo um fator que provavelmente deu muitas vantagens para a eficiência reprodutiva e alta abundância do grupo (Thomaz et al., 2019). *P. reisi* distribui-se pelos riachos costeiros e grandes rios de São Paulo, como rio Ribeira de Iguape, Paranapanema e Sorocaba (Cetra et al., 2017), Tietê (Loeb et al., 2014; Lucinda, 2008) e Itanhaém e seus afluentes, sendo capaz de habitar águas claras e escuras (Ferreira et al., 2014), em corpos d'água de primeira e segunda ordem (Thomaz et al., 2019). *P. reisi* é na maioria das vezes uma das espécies mais abundantes nas comunidades de peixes, e uma das únicas capazes de habitar certos locais mais extremos ou desfavoráveis (Loeb et al., 2014). Em um trabalho realizado com populações do Rio do Castro (Itanhaém/SP), aclimatada a 22°C foi reportado um CTMáx de 34,6°C, o qual elevou-se quando passou a um regime de 26°C (36,7°C). Contudo, o mesmo não foi observado quando a espécie foi aclimatada a 30°C

(36,6°C), demonstrando que ela não conseguiu aumentar a sua tolerância em um regime térmico mais extremo (Panizza, 2021).

O gênero *Scleromystax* (do grego *sclero*, “duro” e do latim *mystax*, “lábio superior”), (Siluriformes, Callichthyidae, Corydoradinae) possui quatro espécies, todas endêmicas de rios e riachos costeiros da Mata Atlântica (C. da S. Gonçalves & Cestari, 2013a), com ocorrência desde o sul da Bahia até o sul de Santa Catarina (Britto & Reis, 2005). Entre as espécies encontra-se o *Scleromystax barbatus* (Siluriformes: Callichthyidae) (Quoy & Gaimard 1824), de nome popular Coridora-bandada, com respiração aérea facultativa (comum na família Callichthyidae) (Satora et al., 2018), e ocorrendo em águas pretas (Esteves et al., 2019) e claras (Fig. 4C).

Nestes ambientes, a espécie utiliza seu aparato bucal para forragear entre o substrato, sugando seu alimento (C. da S. Gonçalves & Cestari, 2013a). Assim como muitos exemplares popularmente nomeados como coridoras, *S. barbatus* é muito conhecido no aquarismo, devido ao seu belo padrão de camuflagem disruptiva e suas características manchas douradas (Fig 5) (Reis, 2003).



Fig. 4: fotos ilustrativas das espécies estudadas neste trabalho: *Hyphessobrycon reticulatus* (A), *Phalloceros reisi* (B), e *Scleromystax barbatus* (C).



Fig. 5: Foto demonstrando a camuflagem disruptiva de um exemplar de *Scleromystax barbatus*. Retirado de Gonçalves e Cestari, 2013a.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Diante do exposto, os objetivos gerais dessa dissertação foram avaliar o efeito da variação anual da temperatura da água na vulnerabilidade térmica de peixes de riachos de águas pretas da sub bacia do Rio Panema, verificando a variação intraespecífica na tolerância térmica das espécies ao longo de diferentes pontos. Além de verificar o efeito do regime térmico aumentado na capacidade de aclimação térmica de peixes de riachos de águas pretas da sub bacia do Rio Panema.

2.2 Objetivos específicos

- i) Determinar o CTM_{áx} e a TSM das espécies *Hyphessobrycon reticulatus*, *Phalloceros reisi* e *Scleromystax barbatus* ao longo do ciclo hidrológico local (Verão, Outono, Inverno e Primavera) em diferentes riachos de águas pretas ao longo do Rio Panema;
- ii) Verificar a capacidade de aclimação térmica (ARR); o nível de variação intraespecífico, a partir do coeficiente de variação intraespecífico (CV); os valores de CTM_{áx} e TSM em função da sazonalidade, para cada espécie, e entre diferentes pontos de águas pretas do Rio Panema;
- iii) Determinar o CTM_{áx} e TSM para as espécies aclimatadas a um regime de 5°C acima da temperatura máxima do Verão, simulando um evento de *heatwave*.
- iiii) Comparar os limites e índices de tolerância térmicas para as três espécies, entre os quatro pontos durante as estações do ano.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados deste estudo e dos valores de CTM_{áx}, observou-se que a tolerância térmica foi significativamente influenciada tanto pelas estações ($P = <0.001$) quanto o ponto/habitat ($P = <0.001$) e a interação entre ambos ($P = <0.001$), para ambos CTM_{áx} e TSM das três espécies estudadas. Outro padrão observado foi que os maiores valores de CTM_{áx} ocorreram durante o Verão (exceto para *P. reisi*), estação mais quente. *P. reisi* teve os maiores valores médios anuais de CTM_{áx} (35,9°C), TSM (14,2°C) e %CV (3,6), o que demonstrou um maior desempenho térmico frente os regimes naturais, e variação entre os indivíduos que tende a favorecer adaptações a novos regimes. Entretanto, os maiores valores de ARR para *H. reticulatus* indicam que a espécie apresenta uma resposta mais positiva e acentuada de aumento de seus limites térmicos conforme o aumento da temperatura, o que por fim lhe fornece a maior plasticidade térmica, principalmente dentro dos regimes naturais de temperatura. Em contrapartida, *S. barbatus* desempenhou as menores médias de CTM_{áx} (33,2°C), TSM (11,7°C) e %CV (2,1) durante o ano, o que a torna a espécie mais sensível termicamente, e com menores chances de conseguir se adaptar em casos de Verões muito quentes, principalmente caso ocorram ondas de calor durante essa estação.

De forma geral, para as três espécies, estação com os menores valores de CTM_{áx} foi o outono, e a com os maiores foi o verão; e os menores e maiores valores ocorreram em P3 e P1, respectivamente. Quanto a TSM, os maiores valores foram o outono, e os menores o verão, ou seja, um padrão invertido do CTM_{áx}; quanto aos pontos, os menores valores foram em P3 e os maiores em P1. As menores ARR's ocorreram em P1, e as maiores em P3, e os menores %CV P2 e os maiores em P3.

Com tais considerações, este trabalho ressalta a importância de estudar e determinar a plasticidade e sensibilidade térmica das espécies, e de uma caracterização ambiental eficiente, uma vez que é o conjunto desses fatores que tende a ditar a performance destes organismos. Com isso é possível saber em qual estado se encontram, e a partir daí ter uma melhor noção se já estão em risco, e quão isso pode se agravar em casos de alterações ambientais e climáticas.

7. REFERÊNCIAS

Abe TK, Kitagawa T, Makiguchi Y, Sato K (2019) Chum salmon migrating upriver adjust to environmental temperatures through metabolic compensation. *J Exp Biol* 222. <https://doi.org/10.1242/jeb.186189>

Almeida R da S, Valente R de O, Cetra M (2022) The effect of hierarchical environmental structure and catchment-scale land cover on fish assemblage composition in streams from the Brazilian south-eastern rain forest. *Hydrobiologia* 849:4485–4497. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04725-4>

Al-Reasi HA, Smith DS, Wood CM (2012) Evaluating the ameliorative effect of natural dissolved organic matter (DOM) quality on copper toxicity to *Daphnia magna*: Improving the BLM. *Ecotoxicology* 21:524–537. <https://doi.org/10.1007/s10646-011-0813-z>

Al-Reasi HA, Wood CM, Smith DS (2011) Physicochemical and spectroscopic properties of natural organic matter (NOM) from various sources and implications for ameliorative effects on metal toxicity to aquatic biota. *Aquat Toxicol* 103:179–190. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.02.015>

Angilleta Jr. M j. (2009) *Thermal Adaptation, A Theoretical and Empirical Synthesis*. Oxford University, New York

Anlauf-Dunn K, Kraskura K, Eliason EJ (2022) Intraspecific variability in thermal tolerance: a case study with coastal cutthroat trout. *Conserv Physiol* 10:1–18. <https://doi.org/10.1093/conphys/coac029>

Baer CF, Travis J (2000) Direct and correlated responses to artificial selection on acute thermal stress tolerance in a live bearing fish. *Evolution (N Y)* 54:238–244. <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2000.tb00024.x>

Barbarossa V, Bosmans J, Wanders N, et al (2021) Threats of global warming to the world's freshwater fishes. *Nat Commun* 12:1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21655-w>

Barrett RDH, Paccard A, Healy TM, et al (2011) Rapid evolution of cold tolerance in stickleback. *Proc R Soc B Biol Sci* 278:233–238. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0923>

Becker CD, Genoway RG (1979) Evaluation of the critical thermal maximum for determining thermal tolerance of freshwater fish. *Environ Biol Fishes* 4:245–256. <https://doi.org/10.1007/BF00005481>

Bícego KC, Gargaglioni LH (2020) *Fisiologia Térmica de Vertebrados*. Cultura Acadêmica, São Paulo, SP

Bojsen BH, Barriga R (2002) Effects of deforestation on fish community structure. *Freshw Biol* 47:2246–2260

Brahmane MP, Pawar SS, Bhendarkar MP, et al (2020) Effect of temperature on body weight, metabolism and thermoregulation of air breathing catfish *Heteropneustes fossilis*. *J Agrometeorol* 22:541–544

Britto MR, Reis RE (2005) A new *Scleromystax* species (Siluriformes: Callichthyidae) from coastal rivers of southern Brazil. *Neotrop Ichthyol* 3:481–488. <https://doi.org/10.1590/s1679-62252005000400005>

Buffenstein R, Amoroso V, Andziak B, et al (2022) The naked truth: a comprehensive clarification and classification of current ‘myths’ in naked mole-rat biology. *Biol Rev* 97:115–140. <https://doi.org/10.1111/brv.12791>

Camargo AFM, Ferreira RAR, Schiavetti A, Bini LM (1996) Influence of physiography and human activity on limnological characteristics of lotic ecosystems of south coast of Sao Paulo, Brazi. *Acta Limnol. Bras.* 8:231–243

Campos DF, Braz-Mota S, Val AL, Almeida-Val VMF (2019) Predicting thermal sensitivity of three Amazon fishes exposed to climate change scenarios. *Ecol Indic* 101:533–540. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.051>

Campos DF, Val AL, Almeida-Val VMF (2018) The influence of lifestyle and swimming behavior on metabolic rate and thermal tolerance of twelve Amazon forest stream fish species. *J Therm Biol* 72:148–154. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.02.002>

Cereja R (2020) Critical thermal maxima in aquatic ectotherms. *Ecol Indic* 119. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106856>

Cetra M, Barrella W, Neto FL, et al (2012) List Fish fauna of headwater streams that cross the Atlantic Forest of south São Paulo state. *J species List Distrib* 8:421–425

Cetra M, Petrere Júnior M, Barrella W (2017) Relative influences of environmental and spatial factors on stream fish assemblages in Brazilian Atlantic rainforest. *Fish Manag Ecol* 24:139–145. <https://doi.org/10.1111/fme.12207>

Comte L, Olden JD (2017) Evolutionary and environmental determinants of freshwater fish thermal tolerance and plasticity. *Glob Chang Biol* 23:728–736. <https://doi.org/10.1111/gcb.13427>

Curtis PJ, Schindler DW (1997) Hydrologic control of dissolved organic matter in low-order Precambrian Shield lakes. *Biogeochemistry* 36:125–138. <https://doi.org/10.1023/A:1005787913638>

Dagosta FCP, Marinho MMF, Camelier P, Lima FCT (2016) A New Species of *Hyphessobrycon* (Characiformes: Characidae) from the Upper Rio Juruena Basin, Central Brazil, with a Redescription of *H. cyanotaenia*. *Copeia* 104:250–259. <https://doi.org/10.1643/CI-15-243>

de Souza LFB (2022) Limites de tolerancia termica e respostas fisiologicas de *Phalloceros caudimaculatus* (Hensel, 1868) aclimatados a diferentes temperaturas. *Unesp - Instituto de Biociências do Câmpus do Litoral Paulista*

dos Santos LD, Schlindwein SL, Fantini AC, et al (2020) Dinâmica do desmatamento da mata atlântica: causas e consequências. *Rev Gestão Sustentabilidade* 9:378–402. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e32020378-402>

Doyle CM, Leberg PL, Klerks PL (2011) Heritability of heat tolerance in a small livebearing fish, *Heterandria formosa*. *Ecotoxicology* 20:535–542. <https://doi.org/10.1007/s10646-011-0624-2>

Duarte RM, Smith DS, Val AL, Wood CM (2016) Dissolved organic carbon from the upper Rio Negro protects zebrafish (*Danio rerio*) against ionoregulatory disturbances caused by low pH exposure. *Sci Rep* 6: <https://doi.org/10.1038/srep20377>

Duarte RM, Wood CM, Val AL, Smith DS (2018) Physiological protective action of dissolved organic carbon on ion regulation and nitrogenous waste excretion of zebrafish (*Danio rerio*) exposed to low pH in ion-poor water. *J Comp Physiol B Biochem Syst Environ Physiol* 188:793–807. <https://doi.org/10.1007/s00360-018-1169-y>

Ern R, Chung D, Frieder CA, et al (2020) Oxygen-dependence of upper thermal limits

in crustaceans from different thermal habitats. *J Therm Biol*

Esteves KE, Silva MHC, Nanini-Costa MH, Petesse ML (2019) Organization of fish assemblages in blackwater Atlantic Forest streams. *Neotrop Ichthyol* 17:1–12.

<https://doi.org/10.1590/1982-0224-20180120>

Ferreira FC (2007) Ictiofauna de Riachos na Planície Costeira da Bacia do Rio Itanhaém, Litoral Sul de São Paulo

Ferreira FC, da Silva AT, Gonçalves C da S, Petrere M (2014) Disentangling the influences of habitat structure and limnological predictors on stream fish communities of a coastal basin, southeastern Brazil. *Neotrop Ichthyol* 12:177–186.

<https://doi.org/10.1590/S1679-62252014000100019>

Ferreira FC, Petrere M (2009) The fish zonation of the Itanhaém river basin in the atlantic forest of southeast brazil. *Hydrobiologia* 636:11–34. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9932-4>

Freitas SR, Hawbaker TJ, Metzger JP (2010) Effects of roads, topography, and land use on forest cover dynamics in the Brazilian Atlantic Forest. *For Ecol Manage* 259:410–417. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.036>

Gaffney JS, Marley NA, Clark SB (1996) Humic and Fulvic Acids and Organic Colloidal Materials in the Environment. *ACS Symp Ser* 651:1–15. <https://doi.org/10.1021/bk-1996-0651.ch001>

Gale MK, Hinch SG, Eliason EJ, et al (2011) Physiological impairment of adult sockeye salmon in fresh water after simulated capture-and-release across a range of temperatures. *Fish Res* 112:85–95. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2011.08.014>

Gonçalves C da S, Braga FM de S (2013) Checklist of freshwater ichthyofauna from coastal streams of Juréia-Itatins Reserve, Southeastern Brazil. *Check List* 9:175–185. <https://doi.org/10.15560/9.2.175>

Gonçalves C da S, Braga FM de S, Casatti L (2018) Trophic structure of coastal freshwater stream fishes from an Atlantic rainforest: evidence of the importance of protected and forest-covered areas to fish diet. *Environ Biol Fishes* 101:933–948. <https://doi.org/10.1007/s10641-018-0749-8>

Gonçalves C da S, Cestari C (2013) Uso de riacho costeiro da Mata Atlântica pelo limpa-fundo *Scleromystax barbatus* (Quoy & Gaimard, 1824). *Neotrop Biol Conserv* 8:115–120. <https://doi.org/10.4013/nbc.2013.83.01>

Gonçalves C da S, Ferreira FC, Silva AT (2016) *Scleromystax macropterus* (Regan, 1913) e *Mimagoniates lateralis* (Nichols, 1913): dois peixes de riachos de Restinga ameaçados de extinção devido à perda de hábitat. Bol Soc Bras Ictiol 116:12–15

Gonçalves S, Manoel F, Braga DS (2013) Checklist of freshwater ichthyofauna from coastal streams of Juréia-Itatins reserve, southeastern Brazil. J species List Distrib 9:175–185

Hernández-sandoval P, Díaz F, Re-araújo AD, et al (2018) Thermal preference, critical thermal limits, oxygen routine consumption and active metabolic scope of *Macrobrachium tenellum* (Smith, 1871) maintained at different acclimation temperatures. Lat Am J Aquat Res 46:558–569. <https://doi.org/10.3856/vol46-issue3-fulltext-9>

Hernández-Sandoval P, Díaz-Herrera F, Díaz-Gaxiola JM, et al (2018) Effect of temperature on growth, survival, thermal behavior, and critical thermal maximum in the juveniles of *Macrobrachium occidentale* (Holthuis, 1950) (Decapoda: Caridea: Palaemonidae) from Mexico. J Crustac Biol 38:483–488. <https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruy024>

Hochachka PW, Somero GN (2002) Biochemical Adaptation: Mechanism and Process in Physiological Evolution. Oxford University Press

Holland A, Wood CM, Smith DS, et al (2017) Nickel toxicity to cardinal tetra (*Paracheirodon axelrodi*) differs seasonally and among the black, white and clear river waters of the Amazon basin. Water Res 123:21–29. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.044>

IPCC (2013) CLIMATE CHANGE 2013 The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC (2014) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC (2018) Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change

Islam SMM, Zahangir MM, Ashaf-Ud-Doulah M, et al (2020) Extreme warm acclimation temperature alters oxygen consumption, micronucleus formation in erythrocytes, and gill morphology of rohu (*Labeo rohita*) fingerlings. Fish Physiol Biochem 46:2323–2330. <https://doi.org/10.1007/s10695-020-00886-6>

Jackson DA, Mandrak NE (2002) Changing fish biodiversity: Predicting the loss of

cyprinid biodiversity due to global climate change. *Am Fish Soc Symp* 2002:89–98

Kikuchi E, De Grande FR, Duarte RM, Vaske-Júnior T (2019b) Thermal response of demersal and pelagic juvenile fishes from the surf zone during a heatwave simulation. *J Appl Ichthyol* 35:1209–1217. <https://doi.org/10.1111/jai.13970>

Lapointe D, Cooperman MS, Chapman LJ, et al (2018) Predicted impacts of climate warming on aerobic performance and upper thermal tolerance of six tropical freshwater fishes spanning three continents. *Conserv Physiol* 6:1–19. <https://doi.org/10.1093/conphys/coy056>

Le MH, Dinh K V., Nguyen M V., Rønnestad I (2020) Combined effects of a simulated marine heatwave and an algal toxin on a tropical marine aquaculture fish cobia (*Rachycentron canadum*). *Aquac Res* 51:2535–2544. <https://doi.org/10.1111/are.14596>

Leclair ATA, Drake DAR, Pratt TC, Mandrak NE (2020) Seasonal variation in thermal tolerance of redbside dace *Clinostomus elongatus*. *Conserv Physiol* 8:1–11. <https://doi.org/10.1093/conphys/coaa081>

Lefevre S, Wang T, McKenzie DJ (2021) The role of mechanistic physiology in investigating impacts of global warming on fishes. *J Exp Biol* 224:.
<https://doi.org/10.1242/jeb.238840>

Lo YTE, Mitchell DM, Thompson R, et al (2022) Estimating heat-related mortality in near real time for national heatwave plans. *Environ Res Lett* 17:12.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4cf4>

Loeb M V., Fichberg I, Mattox GMT (2014) Ichthyofauna of the Ribeirão Taboão, Paraíba do Sul river basin, Mogi das Cruzes, SP. *Check List* 10:556–561.
<https://doi.org/10.15560/10.3.556>

Loeschke V, Hoffmann AA (2007) Consequences of Heat Hardening on a Field Fitness Component in *Drosophila* Depend on. *Am Soc Nat* 169:175–183

Lucinda PHF (2008) Systematics and biogeography of the genus *Phalloceros* Eigenmann, 1907 (Cyprinodontiformes : Poeciliidae : Poeciliinae), with the description of twenty-one new species. *Neotrop Ichthyol* 6:113–158

Luiders, C.D., Crusius, J., Playle, R.C., Curtis, P.J., 2004. Influence of natural organic matter source on copper speciation as demonstrated by Cu binding to fish gills, by ion selective electrode, and by DGT gel sampler. *Environ. Sci. Technol.* 28, 2865–2872.

Lynch AJ, Myers BJE, Chu C, et al (2016) Climate Change Effects on North American Inland Fish Populations and Assemblages. *Fisheries* 41:346–361.

<https://doi.org/10.1080/03632415.2016.1186016>

Madeira C, Mendonça V, Leal MC, et al (2017) Thermal stress, thermal safety margins and acclimation capacity in tropical shallow waters—An experimental approach testing multiple end-points in two common fish. *Ecol Indic* 81:146–158.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.050>

Madeira D, Andrade J, Leal MC, et al (2020) Synergistic Effects of Ocean Warming and Cyanide Poisoning in an Ornamental Tropical Reef Fish. *Front Mar Sci* 7:1–11.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00246>

Madeira D, Narciso L, Cabral HN, et al (2012a) HSP70 production patterns in coastal and estuarine organisms facing increasing temperatures. *J Sea Res* 73:137–147.

<https://doi.org/10.1016/j.seares.2012.07.003>

Madeira D, Narciso L, Cabral HN, Vinagre C (2012b) Thermal tolerance and potential impacts of climate change on coastal and estuarine organisms. *J Sea Res* 70:32–41.

<https://doi.org/10.1016/j.seares.2012.03.002>

Mameri D, Branco P, Ferreira MT, Santos JM (2020) Heatwave effects on the swimming behaviour of a Mediterranean freshwater fish, the Iberian barbel *Luciobarbus bocagei*. *Sci Total Environ* 730. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139152>

Martins Santos RC (2010) Mata Atlântica: Características, Biodiversidade e a História de Um Dos Biomas de Maior Prioridade para Conservação e Preservação de Seus Ecossistemas

McDonnell LH, Chapman LJ (2015) At the edge of the thermal window: Effects of elevated temperature on the resting metabolism, hypoxia tolerance and upper critical thermal limit of a widespread African cichlid. *Conserv Physiol* 3:1–13.

<https://doi.org/10.1093/conphys/cov050>

McKnight DM, Boyer EW, Westerhoff PK, et al (2001) Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnol Oceanogr* 46:38–48. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.1.0038>

Mendonça FP, Magnusson WE, Zuanon J (2005) Relationships between Habitat Characteristics and Fish Assemblages in Small Streams of Central Amazonia. *BioOne Complet* 2005:751–764. [https://doi.org/10.1643/0045-8511\(2005\)005\[0751:rbhcaf\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1643/0045-8511(2005)005[0751:rbhcaf]2.0.co;2)

Morgan R, Finnøen MH, Jensen H, et al (2020a) Low potential for evolutionary rescue from climate change in a tropical fish. *Proc Natl Acad Sci U S A* 117:33365–33372.

<https://doi.org/10.1073/PNAS.2011419117>

Morgan R, Finnøen MH, Jensen H, et al (2020b) Low potential for evolutionary rescue from climate change in a tropical fish. *Proc Natl Acad Sci* 117:33365–33372.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2011419117/-/DCSupplemental>

Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, et al (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853–858

Nati JJH, Svendsen MBS, Marras S, et al (2021) Intraspecific variation in thermal tolerance differs between tropical and temperate fishes. *Sci Rep* 11:1–9.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-00695-8>

Peressin A, da Silva Gonçalves C, Cetra M (2018) Ichthyofauna diet changes in response to urbanization: the case of upper Paranapanema River basin (Brazil). *Urban Ecosyst* 21:795–803. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0755-9>

Pinto L, Bede L, Paese A, et al (2006) Mata Atlântica brasileira: Os desafios para a conservação da biodiversidade de um *hotspot* mundial. *Essências em Biol e Conserv* January:1–24

Pollux BJA, Pires MN, Banet AI, Reznick DN (2009) Evolution of placentas in the fish family Poeciliidae: An empirical study of macroevolution. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 40:271–289. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120209>

Reis R (2003) Family Callichthyidae (armored catfishes). *Check List Freshw Fishes South Cent Am* 291–309

Richards, J.F., Curtis, P.J., Burnison, B.K., Playle, R.C., 2001. Effects of natural organic matter source on reducing metal toxicity to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and on metal binding to their gills. *Environ. Toxicol. Chem.* 20, 1159–1166.

Roni N, Kadir NN, Werorilangi S, Bennett WA (2019) Impact of changing temperature on critical thermal maximum and metabolic rate of *Uca perplexa* and *Uca crassipes*. *Ecol Quest* 30:17–24. <https://doi.org/10.12775/EQ.2019.015>

Santana CA, Tondato KK, Suárez YR (2019) Reproductive biology of *Hypessobrycon eques* (Characiformes: Characidae) in southern Pantanal, Brazil. *Brazilian J Biol* 79:70–79. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.176273>

Sarma K, Pal AK, Ayyappan S, et al (2010) Acclimation of *Anabas testudineus* (Bloch) to three test temperatures influences thermal tolerance and oxygen consumption. *Fish Physiol Biochem* 36:85–90. <https://doi.org/10.1007/s10695-008-9293-3>

Satora L, Mytych J, Bilska-Kos A (2018) The presence and expression of the HIF-1 α in the respiratory intestine of the bronze Corydoras *Corydoras aeneus* (Callichthyidae Teleostei). *Fish Physiol Biochem* 44:1291–1297. <https://doi.org/10.1007/s10695-018-0520-2>

Schulte PM, Healy TM, Fanguie NA (2011) Thermal performance curves, phenotypic plasticity, and the time scales of temperature exposure. *Integr Comp Biol* 51:691–702. <https://doi.org/10.1093/icb/icr097>

Schwartz, M.L., Curtis, P.J., Playle, R.C., 2004. Influence of natural organic matter on acute copper, lead, and cadmium toxicity to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Environ. Toxicol. Chem.* 23, 2889–2899.

Stillman J. (2003) Acclimation Capacity Underlies Susceptibility to Climate Change. *Science* (80-) 301:64–65

Sunday JM, Bates AE, Dulvy NK (2012) Thermal tolerance and the global redistribution of animals. *Nat Clim Chang* 2:686–690. <https://doi.org/10.1038/nclimate1539>

Thomaz AT, Carvalho TP, Malabarba LR, Knowles LL (2019) Geographic distributions, phenotypes, and phylogenetic relationships of Phalloceros (Cyprinodontiformes: Poeciliidae): Insights about diversification among sympatric species pools. *Mol Phylogenet Evol* 132:265–274. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2018.12.008>

Turko AJ, Nolan CB, Balshine S, et al (2020) Thermal tolerance depends on season, age and body condition in imperilled redbreast sunfish *Lepomis gibbosus*. *Conserv Physiol* 8:1–15. <https://doi.org/10.1093/conphys/coaa062>

Vinagre C, Dias M, Cereja R, et al (2019) Upper thermal limits and warming safety margins of coastal marine species – Indicator baseline for future reference. *Ecol Indic* 102:644–649. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.030>

Vinagre C, Leal I, Mendonça V, et al (2016) Vulnerability to climate warming and acclimation capacity of tropical and temperate coastal organisms. *Ecol Indic* 62:317–327. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.010>

Vinagre C, Leal I, Mendonça V, Flores AA V (2015) Effect of warming rate on the critical thermal maxima of crabs, shrimp and fish. *J Therm Biol* 47:19–25. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.10.012>

Vinagre C, Mendonça V, Cereja R, et al (2018) Ecological traps in shallow coastal waters — Potential effect of heatwaves in tropical and temperate organisms. *PLoS One* 13:1–17

Wegner, N. C., Snodgrass, O. E., Dewar, H., & Hyde, J. R. (2015a). Whole-body endothermy in a mesopelagic fish, the opah, *Lampris guttatus*. *Science*, 348(6236), 786–789.

Westley PAH (2020) Documentation of en route mortality of summer chum salmon in the Koyukuk River, Alaska and its potential linkage to the heatwave of 2019. *Ecol Evol* 10:10296–10304. <https://doi.org/10.1002/ece3.6751>

Zhou LY, Fu SJ, Fu C, et al (2019) Effects of acclimation temperature on the thermal tolerance, hypoxia tolerance and swimming performance of two endangered fish species in China. *J Comp Physiol B Biochem Syst Environ Physiol* 189:237–247. <https://doi.org/10.1007/s00360-018-01201-9>

Zillig KW, Lusardi RA, Moyle PB, Fangue NA (2021) One size does not fit all: variation in thermal eco-physiology among Pacific salmonids. *Rev Fish Biol Fish* 31:95–114. <https://doi.org/10.1007/s11160-020-09632-w>