



ECOLOGIA DE PEIXES EM RIACHOS URBANOS

Piatã Marques^{1} & Almir Manoel Cunico²*

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Programa de Pós graduação em Ecologia e Evolução - PPGEE - CAPES PrInt. Rua São Francisco Xavier 525, Maracanã, CEP 20550-019, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Universidade Federal do Paraná, Departamento de Biodiversidade, Laboratório de Ecologia, Pesca e Ictiologia, Rua Pioneiro, nº 2153, Jardim Dallas, CEP: 85950-000, Palotina, PR, Brasil.

Emails: piata_bio@yahoo.com.br (*autor correspondente); almircunico@gmail.com

Resumo: O advento da agricultura e da domesticação animal influenciou a organização social das populações humanas tornando-as sedentárias, com elevado crescimento populacional e concentradas em centros urbanos. O processo de urbanização altera paisagens e modifica o uso e ocupação do solo, dando origem a ambientes urbanos em que a ação do homem define a estrutura, o funcionamento e a dinâmica. Apesar da crescente expansão urbanização, nós ainda sabemos muito pouco sobre seus efeitos ecológicos. Neste artigo, apresentamos o estado do conhecimento acerca dos efeitos da urbanização nos riachos e sua ictiofauna sob a ótica da biodiversidade aquática, suas interações ecológicas, adaptações bióticas e sua conservação. Também discutimos aspectos teóricos, abordagens e metodologias utilizadas para o estudo dos peixes em riachos urbanos. Os tópicos apresentados neste artigo têm o objetivo de introduzir ao leitor aspectos fundamentais da ecologia de peixes urbanos, bem como apresentar as principais abordagens com o intuito de fomentar o desenvolvimento de estudos futuros.

Palavras-chave: Antropogênico; Biota urbana, Cidade, Ecologia humana; Impacto, Síndrome dos riachos urbanos.

FISH ECOLOGY IN URBAN STREAMS: The development of agriculture allowed humans to congregate in settlements which developed into the modern urban societies. This urbanization process caused profound habitat changes, giving rise to urban ecosystems where the structure, functioning and the dynamics of the ecosystem are determined by human activities. Despite the increasing rates of urbanization worldwide, the ecology of urban ecosystems is poorly known. In this chapter, we focus on urban stream ecosystems to expose the current advances in urban fish ecology. We explore topics concerning urban fish biodiversity, ecological interactions and adaptation to urban systems. We also explore different approaches and methodologies for the study of urban fish. Our goal is to introduce the theoretical background and analytical tools to study urban fishes with the intent of facilitating future research.

Keywords: Anthropogenic; City; Human ecology; Impact; Urban stream syndrome; Urban biota.

INTRODUÇÃO

Urbanização e seus efeitos nos riachos

Atualmente mais da metade da população mundial vive em áreas urbanas e até 2050 este

número alcançará cerca de 6.68 bilhões de pessoas (United Nations 2019). A maior taxa de crescimento da população urbana é esperada nos países em desenvolvimento, como o Brasil, que responderão por 83 % da população urbana

mundial até 2050 (United Nations 2019). O crescimento da população urbana tem forçado a expansão das cidades. Esse processo de urbanização transforma a paisagem natural por meio de obras de infraestrutura como a construção de prédios, casas e estradas, alterando habitats e promovendo poluição (Alberti 2008). Desta maneira, a urbanização pressiona mudanças nos padrões e processos ecológicos, originando um ecossistema urbano com alta densidade humana, em que as interações homem-ambiente determinam a estrutura, funcionamento e a dinâmica do ecossistema (Wu 2014).

A urbanização causa profundas alterações nos ecossistemas de riacho. Estruturas urbanas são construídas, essencialmente, com materiais impermeáveis como concreto e asfalto, que promovem a impermeabilização do solo e impedindo a infiltração da água das chuvas. Para evitar que a água das chuvas acumule na superfície, o que causa alagamentos, as cidades possuem sistemas de calhas e tubulações que coletam a água de escoamento superficial e direcionam para os riachos urbanos escoando

Tabela 1. Principais sintomas da Síndrome dos Riachos Urbanos (SRU). Onde ↑ representa aumento e ↓ redução da variável em questão. Adaptado de Walsh *et al.* (2005).

Table 1. Symptoms of the Urban Stream Syndrome (SRU). Where ↑ shows increase and ↓ decrease of the environmental variable. Adapted from Walsh *et al.* (2005).

Aspecto do riacho	Sintomas da SRU
Hidrologia	↑ Frequência de transbordamento
	↑ Frequência de fluxo erosivo
	↑ Magnitude de cheia
	↓ Intervalo de tempo para o fluxo máximo
	↑ Modificação da vazão no hidrograma durante tempestades
Química da água	↑ Nutrientes (Fósforo e Nitrogênio)
	↑ Contaminantes
	↑ Temperatura
Morfologia do canal	↑ Largura do canal
	↑ Profundidade das poças
	↑ Erosão
	↓ Complexidade do canal
Matéria orgânica	↓ Retenção
Peixes	↓ Espécies sensíveis
Invertebrados	↓ Espécies sensíveis
Algas	↑ Diatomáceas eutróficas
	↓ Diatomáceas oligotróficas
Processos ecossistêmicos	↓ Absorção de nutrientes

para fora da área urbana. O despejo de água de escoamento superficial é uma das principais fontes de degradação dos riachos urbanos. Esta prática modifica a hidrologia do riacho, causando maior fluxo de água e eventos de enxurrada com maior frequência e intensidade. Além disso, promove o aumento da concentração de nutrientes dissolvidos, que são limitantes à produtividade primária (principalmente Nitrogênio e Fósforo) e contaminantes (pesticidas, herbicidas, produtos farmacêuticos, metais pesados). Essas alterações levam a eliminação de muitas espécies aquáticas (Walsh *et al.* 2012, 2016). Esses efeitos são os principais sintomas da Síndrome dos Riachos Urbanos - SRU (Urban Stream Syndrome) (Walsh *et al.* 2005), que descreve as principais características físicas, químicas e biológicas nestes ambientes (Tabela 1).

A SRU foi caracterizada em diversas áreas urbanas ao redor do mundo, sugerindo que esta é uma importante generalização da condição dos riachos urbanos e tem contribuído para avançar nos estudos destes ecossistemas. Contudo, ainda

sabemos pouco acerca dos padrões e processos ecológicos que envolvem a biota nestes ambientes (Marques *et al.* 2019).

Neste artigo nós focamos na ictiofauna encontrada em riachos urbanos e abordamos sua biodiversidade (composição taxonômica e funcional), interações ecológicas (relações tróficas) e adaptações. Apresentamos, também, aspectos teóricos, abordagens e métodos para o desenvolvimento de estudos, bem como enfatizamos a importância da conservação da biodiversidade íctica nestes ambientes.

Ressaltamos que o presente artigo não apresenta uma revisão sistematizada sobre os estudos que abordam a ecologia de peixes em riachos urbanos, mas sim um sumário das informações básicas que, de acordo com nossa experiência, julgamos necessárias para a elaboração de estudos nesse campo.

Biodiversidade dos peixes em riachos urbanos

Apesar da profunda modificação no hábitat, diferentes espécies são encontradas em riachos de áreas urbanas. Estas espécies são referidas como sinantrópicas, exploradoras, urbanófilas, adaptadas (*synanthropes*, *explorers*, *urbanophiles*, *adapters*, respectivamente) (McKinney 2006), sinúrbicas (*synurbic*) (Francis & Chadwick 2012), utilizadores / habitantes urbanos (*urban utilizers*, *urban dwellers*) (Fischer *et al.* 2015, Tabela 2). Cada um desses termos usa um conjunto diferente de critérios que envolvem ocorrência, densidade e

dinâmica populacional para determinar o que é uma espécie urbana (Tabela 2). Não existe consenso quanto ao termo mais apropriado, por isso é importante que estudos sobre a biodiversidade apresentem uma clara definição de espécie urbana.

A biodiversidade tem sido o principal foco dos estudos ecológicos em ambientes urbanos, incluindo os riachos (McDonnell & Hahs 2013, Marques *et al.* 2019). Diferentes componentes da biodiversidade (riqueza taxonômica, abundância, diversidade filogenética e funcional) vem sendo aplicados nos estudos recentes e as evidências indicam uma profunda alteração na biodiversidade em ecossistemas urbanos (Faeth *et al.* 2011), especialmente devido ao aumento da extinção local e introdução de espécies (Shochat *et al.* 2010).

Extinção local de espécies

As rápidas mudanças do hábitat, que são impostas pela urbanização, fazem com que espécies sensíveis sejam extirpadas (extintas localmente), enquanto espécies tolerantes persistam (Walsh *et al.* 2005, Shochat *et al.* 2010). As espécies tolerantes são aquelas que possuem características que permitem um rápido ajuste ou resistência às mudanças ambientais promovidas pela urbanização (Wang *et al.* 2001). Espécies de peixes de riacho que são onívoras, com grande sucesso reprodutivo (ciclo de vida curto e prolíferas) e resistentes a um ambiente com variação de temperatura, alta concentração

Tabela 2. Termos utilizados para designar uma espécie urbana e suas definições.

Table 2. Terms commonly used for referring to species in urban areas.

Termo	Definição	Referência
Sinantrópico/explorador/urbanófilo	Persistem em áreas urbanas como comensais até se tornarem dependentes dos recursos urbanos.	McKinney (2006)
Adaptado	Conseguem se adaptar à urbanização, mas também utilizam recursos de áreas não-urbanas.	
Sinúrbico	Espécies em que a densidade das populações urbanas supera aquela das populações não-urbanas.	Francis & Chadwick (2012)
Utilizador urbano	Ocorrem em áreas urbanas como não reprodutores ou reprodutores que imigraram de áreas não-urbanas adjacentes.	Fischer et al. (2015)
Habitante urbano	Mantêm populações urbanas com taxa de crescimento estável independente de imigração das áreas não-urbanas adjacentes.	

de contaminantes, destacam-se como as mais tolerantes à urbanização (Cunico *et al.* 2011, Peressin *et al.* 2018). Contudo, poucas são as espécies tolerantes e a urbanização acaba por causar grande extinção local, mesmo que, em alguns casos, seja observado manutenção ou mesmo aumento da riqueza em decorrência da introdução de espécies não-nativas (Marchetti *et al.* 2006).

Introdução de espécies não-nativas

As áreas urbanas são centros de introdução e disseminação de espécies não-nativas devido ao grande fluxo de bens e pessoas (Padayachee *et al.* 2017, Francis *et al.* 2019). Geralmente, as espécies não-nativas são intencionalmente introduzidas por liberação ativa no ambiente ou são resultado de escape, dispersando-se, no ambiente aquático urbano, por meios próprios (Padayachee *et al.* 2017). As atividades econômicas voltadas a aquicultura, incluindo a produção de alimento e pesca esportiva (pesqueiros, pesque-pague) destacam-se como a principal fonte de introdução de peixes não-nativos que escapam para o ambiente devido a falha nas estruturas de contenção e/ou no manejo (Fernandes *et al.* 2003, Nobile *et al.* 2019). Da mesma forma, o comércio de peixes ornamentais é um importante mecanismo de introdução de espécies (Tuckett *et al.* 2017, Ferraz *et al.* 2019). Outra importante fonte de introdução de espécies em riachos urbanos é o uso de peixes para o controle biológico de doenças como Dengue e Zica (Azevedo-Santos *et al.* 2017). Apesar de ser adotada em larga escala por diversos países, ainda não existe consenso sobre a eficiência dos peixes no controle e redução das taxas de infecção das diferentes doenças (Lawrence *et al.* 2016, El-Sabaawi *et al.* 2016). Ainda, a introdução das espécies larvicidas pode ter grandes consequências para a estrutura e funcionamento do ecossistema que ainda são pouco conhecidas (El-Sabaawi *et al.* 2016).

Homogeneização biológica

O processo de extinção e introdução de espécies é similar em diversas cidades ao redor do mundo, isto porque a urbanização altera o hábitat das espécies nativas e sensíveis, ao mesmo tempo em que cria um ambiente que facilita a chegada de espécies não-nativas capazes de se

adaptar (Figura 1) (McKinney 2006, Padayachee *et al.* 2017). Este cenário leva ao processo de homogeneização da fauna de peixes em riachos urbanos, com evidente perda de distinção de populações e comunidades em nível de organização taxonômica, funcional, filogenética ou genética (Figura 1) (Petsch 2016).

A homogeneização taxonômica é caracterizada pela maior similaridade na composição da comunidade de peixes entre riachos urbanos geograficamente distantes entre si, do que entre riachos urbanos e não-urbanos, geograficamente próximos, ao longo do tempo (Olden 2006). Entretanto, a composição da comunidade (perda e o ganho de espécies) não é um processo aleatório e pode ser influenciado pelas características funcionais das espécies (*functional traits*) (McKinney & Lockwood 1999). Neste caso, a substituição de espécies mais sensíveis por espécies tolerantes à urbanização, conduz à homogeneização funcional (Figura 2) (Clavel *et al.* 2011, Cunico *et al.* 2011). Da mesma forma, a urbanização pode favorecer espécies filogeneticamente relacionadas, devido a conservação de características funcionais que propiciam tolerância às alterações ambientais, o que também torna a comunidade mais homogênea filogeneticamente. Por exemplo, espécies da família Poeciliidae, são regularmente encontradas em riachos urbanos em todo o mundo (Seng *et al.* 2008, Strecker *et al.* 2011) em elevada abundância (Cunico *et al.* 2009, Pereira *et al.* 2014).

Por fim, a introdução de espécies não-nativas bem como a redução drástica do tamanho das populações (efeito de gargalo) resultante da urbanização, reduzem a variabilidade genética. Esse processo conduz as comunidades à homogeneização gênica (Figura 1), a qual embora ainda pouco estudada em ambientes aquáticos urbanos, pode resultar em consequências ecológicas e evolucionárias importantes. A homogeneização genética pode comprometer a capacidade de adaptação de uma população, sua resistência a doenças e espécies invasoras, bem como promover o sucesso de competidores híbridos (Olden 2006, Vitule & Pozenato 2012).

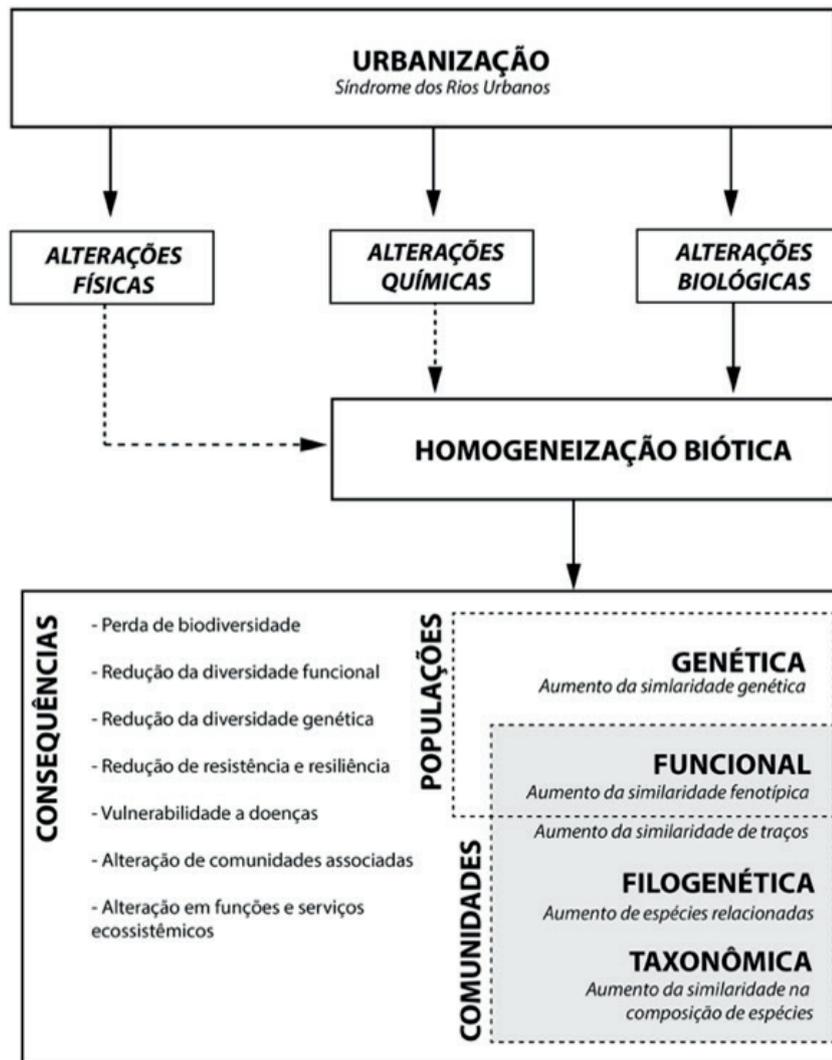


Figura 1. Influência da urbanização (Síndrome dos Rios Urbanos) sobre a homogeneização biótica em diferentes níveis de organização (populações e comunidades) e relações biológicas (genética, funcional, filogenética e taxonômica), bem como potenciais consequências sobre a ecologia de populações, comunidades e ecossistemas. Setas tracejadas indicam efeitos indiretos.

Figure 1. The homogenizing effect of urbanization (the Urban Stream Syndrome) to multiple levels of biological organization (populations and communities), biological interactions (genes, functional, phylogenetic and taxonomic) and its consequences to population dynamics, community structure and ecosystem functioning. Dashed arrows show indirect effects.

Interações ecológicas e adaptação dos peixes à urbanização

Os fatores que determinam a biodiversidade urbana ainda não são claros (McDonnell & Hahs 2013, Turrini & Knop 2015). Enquanto a alteração do habitat pode explicar a perda de espécies, ela pode não esclarecer os padrões de biodiversidade a nível de comunidade, os quais envolvem interações tróficas, adaptabilidade e evolução

(McDonnell & Hahs 2015).

Estrutura trófica

A urbanização tem potencial para causar profundas alterações nas teias tróficas (El-Sabaawi 2018). A SRU prevê o aumento na concentração de nutrientes limitantes à produtividade primária (Nitrogênio e Fósforo) e maior incidência de luz solar devido à redução da vegetação ripária

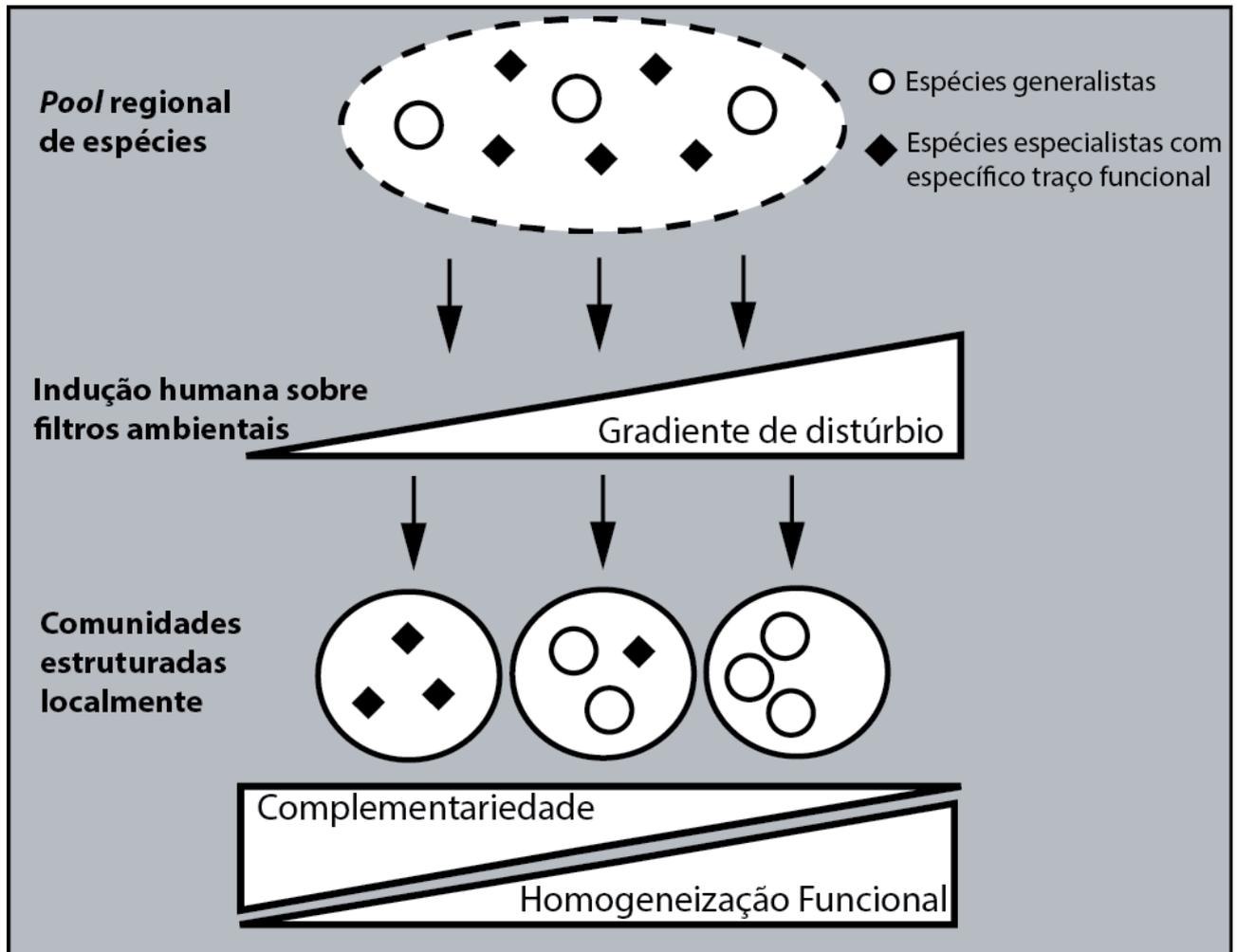


Figura 2. O pool regional de espécies abrange generalistas e especialistas, com características funcionais específicas. Gradientes antropogênicos de distúrbios, como a urbanização, filtram as espécies em uma comunidade, com base em características funcionais. Ecossistemas preservados têm comunidades especializadas com alta complementaridade e funções ecossistêmicas singulares, enquanto sistemas urbanos favorecem espécies generalistas e conduzem a comunidade à homogeneização taxonômica, funcional e filogenética. Adaptado de Clavel *et al.* (2011).

Figure 2. Regional species pool having generalists and specialist species with different functional traits. Human disturbance such as urbanization filter species based on their traits. Preserved ecosystems have communities with highly specialized species, thus high complementarity and unique functional roles. While urbanization favors generalist species, leading to the taxonomic, functional and phylogenetic homogenization of the community. Adapted from Clavel *et al.* (2011).

(Walsh *et al.* 2005). Como consequência, espera-se um aumento na produtividade primária nos riachos urbanos (R. C. Johnson *et al.* 2013). Ainda, o despejo de esgoto e restos de alimento podem ser uma importante fonte de alimento em riachos urbanos. Por exemplo, grande parte do carbono assimilado por guppies, *Poecilia reticulata*, de rios urbanos vem do esgoto (Carvalho *et al.* 2019).

As relações tróficas também são afetadas pelas mudanças na biodiversidade urbana, discutidas anteriormente. Os predadores são geralmente mais sensíveis a mudanças ambientais, e, portanto,

mais vulneráveis à urbanização. A extinção local de predadores pode levar a modificações profundas nas características individuais e na dinâmica das populações de presas, com efeitos em cascata que afetam a estrutura da comunidade e processos ecossistêmicos (El-Sabaawi 2018). Ainda, a introdução de espécies não-nativas pode intensificar a competição entre os consumidores, resultando em exclusão competitiva que reorganiza a estrutura trófica (Shochat *et al.* 2010).

Adaptação, plasticidade e evolução

As profundas mudanças no hábitat e nas interações bióticas impostas pela urbanização, forçam as espécies a se adaptarem rapidamente para evitar a extinção local. Esta adaptação pode estar relacionada a mudanças não-herdáveis (plasticidade fenotípica) ou herdáveis (evolutivas), e ambas são fundamentais para a persistência das espécies no ambiente urbano.

Tem sido cada vez mais reconhecido que a urbanização promove mudanças rápidas, que ocorrem ao longo de décadas e são herdáveis, e portanto, tem caráter evolutivo (Alberti *et al.* 2017a, 2017b, Johnson & Munshi-South 2017). Essa evolução contemporânea pode ter consequências para a dinâmica da população, estrutura da comunidade e funcionamento do ecossistema (Johnson & Munshi-South 2017). Isso abre a possibilidade para a ocorrência de feedbacks eco-evolutivos (eco-evolutionary feedbacks), em que ecologia e evolução se influenciam mutuamente (Alberti 2015).

Os mecanismos que determinam a evolução e feedbacks eco-evolutivos nas cidades ainda são pouco conhecidos (Alberti 2015, Alberti *et al.* 2017b). Para a biota de riacho, incluindo os peixes, relacionar cada um dos componentes da SRU à mudanças específicas das características fenotípicas, pode permitir entender os mecanismos de adaptação e ajudar a propor feedbacks eco-evolutivos (Marques *et al.* 2019). Entender a evolução contemporânea em ambientes urbanos é fundamental para o desenvolvimento da ciência da biologia evolutiva e promover o entendimento das taxas, direção e repetibilidade da adaptação dos peixes em sistemas urbanos e não-urbanos (Donihue & Lambert 2015).

ASPECTOS METODOLÓGICOS

A seguir reunimos informações para contribuir com o desenvolvimento de projetos em ecologia de peixes de riachos urbanos. Os tópicos que seguem têm por objetivo auxiliar na estruturação da base teórica, hipóteses, coleta e interpretação dos dados de estudos futuros.

Definindo “urbano”

Apesar de crucial, uma dificuldade constante nos estudos em ambientes urbanos está em se

obter uma ou um conjunto de poucas variáveis ambientais que descrevam adequadamente o efeito da urbanização para definir o que é urbano. Ou seja, qual/quais variáveis determinam um gradiente urbano ou uma área urbana? Esta questão gera controvérsias pois o termo é usado em áreas tão diversas quanto Ecologia e Sociologia, e uma definição única universal não parece possível ou mesmo necessária (McIntyre *et al.* 2008). Assim, sugerimos a estrutura conceitual apresentada por Moll *et al.* (2019) que organiza os diferentes métodos utilizados para caracterizar “urbano” encontrados na literatura.

Em riachos, a definição de urbano geralmente é baseada na porcentagem da área próxima ao riacho que é coberta por superfícies impermeáveis (*e.g.* asfalto, concreto). Uma maior porcentagem de superfície impermeável indica um riacho urbano (Morse *et al.* 2003, Walsh *et al.* 2016). Isso porque a área de cobertura impermeável está diretamente relacionada ao volume de água de escoamento (*runoff water*) que chega até os riachos através da infraestrutura de calhas e tubulações, causando os principais sintomas da SRU (Walsh *et al.* 2012). Contudo, diferenças climatológicas, fisiogeográficas e socioeconômicas, podem gerar variações na maneira pela qual a síndrome se manifesta no nível local e regional, o que afeta a definição das variáveis que caracterizam um riacho urbano (Booth *et al.* 2016, Capps *et al.* 2016). Por exemplo, a falta de saneamento básico em países em desenvolvimento, como o Brasil, pode levar ao despejo de grandes volumes de esgoto sem tratamento nos riachos, superando o que seria esperado baseado na SRU (Ramírez *et al.* 2009, 2014). Neste sentido, sugerimos aos pesquisadores especial atenção na escolha e caracterização das variáveis ambientais que serão utilizadas para definir um gradiente de urbanização ou um riacho urbano. O uso de técnicas de análise multivariada (*e.g.* PCA, PCoA) podem ajudar a identificar a variável, ou conjunto de variáveis, que melhor caracteriza o gradiente de um riacho urbano.

Efeito urbano passado, presente e futuro

A paisagem urbana em que os riachos estão inseridos passou e ainda passa por diversas transformações históricas. Em muitos casos, uma paisagem agrícola deu origem ou foi tomada pela paisagem urbana (Vietz *et al.* 2016). Este

histórico de diferentes usos do solo pode definir os processos e padrões ecológicos encontrados, dificultando a identificação do efeito da urbanização nos riachos (Allan 2004, Parr *et al.* 2016, Vietz *et al.* 2016).

A paisagem urbana também varia no tempo e espaço, de acordo com mudanças na população humana e de seus fatores socioeconômicos (Zhou *et al.* 2017). Essas transformações definem a infraestrutura (*e.g.* calhas, tubulações, reservatórios de contenção, estação de tratamento) utilizada para lidar com as águas superficiais e residuais (águas urbanas) (Parr *et al.* 2016). O tipo de infraestrutura de águas urbanas afeta o funcionamento dos ecossistemas de riacho, principalmente através dos efeitos na hidrologia e qualidade da água (Walsh *et al.* 2016). Portanto, os pesquisadores interessados no estudo dos peixes de riachos urbanos devem considerar não só os efeitos atuais da urbanização, mas também como o histórico de uso do solo e desenvolvimento urbano pode ter afetado a ecologia desses organismos.

Paradigmas que fundamentam o estudo da ecologia de peixes em riachos urbanos

Os estudos ecológicos em ambiente urbano têm sido o foco da ecologia urbana. Esse novo ramo da ecologia está em pleno desenvolvimento, muito em razão da crescente expansão das cidades e consequente urbanização em todo o mundo (Wu 2014). A ecologia urbana foca em entender como os sistemas humano e ecológico interagem e se influenciam mutuamente (Alberti 2008). A ecologia urbana atualmente trabalha com três paradigmas complementares que direcionam diferentes abordagens. São eles: ecologia “*na*”, “*da*” e “*para*” a cidade (*ecology in, of and for the city*) (Pickett *et al.* 2016). Inserir os estudos sobre os peixes de riachos urbanos no contexto destes paradigmas é fundamental para integrar os ambientes aquáticos nos avanços já realizados nas outras áreas da ecologia urbana. A seguir, descrevemos cada paradigma, apresentamos seus desafios e o tipo de estudo que pode ser desenvolvido dentro da ecologia de peixes de riacho.

Ecologia de peixes de riacho *na* cidade

O paradigma da ecologia *na* cidade busca

entender a ecologia dos organismos que estão em fragmentos de habitats inseridos na matriz urbana (fragmentos florestais, parques, cemitérios e terrenos abandonados). Estudos sobre a ecologia de peixes de riacho que adotam o paradigma da ecologia *na* cidade geralmente utilizam trechos de riacho como unidade amostral, distribuídos em um desenho amostral que captura variações ao longo de um gradiente ambiental (gradiente rural-urbano, florestal-urbano) ou um desenho amostral que compara riachos ou trechos de riachos urbanos *vs* não-urbanos. Se inserem neste paradigma a maioria dos estudos atuais sobre os peixes de riachos urbanos, incluindo aqueles que abordam padrões da biodiversidade, sucessão, estrutura da comunidade, invasão biológica, adaptação e teias tróficas (*e.g.* Murphy *et al.* 2016, Cunico & Gubiani, 2016, Kern & Langerhans 2018, El-Sabaawi 2018).

Ecologia de peixes de riacho *da* cidade

Este paradigma expande o anterior e leva em consideração que os fragmentos e a matriz urbana (área urbana onde estão inseridos os fragmentos) interagem, fazendo com que a cidade seja vista como um único ecossistema. Neste paradigma, padrões e processos emergem da interação e feedbacks entre os componentes sociais, ecológicos e estruturas construídas em uma abordagem que entende a cidade como um sistema sócio-ecológico altamente complexo e interativo (Alberti 2008, McPhearson *et al.* 2016). Desta maneira, uma integração entre disciplinas da ecologia, ciências sociais, geografia, economia e urbanismo é fundamental para viabilizar a abordagem transdisciplinar proposta pela ecologia *da* cidade (McPhearson *et al.* 2016, Pickett *et al.* 2016). Podem ser inseridos neste paradigma os estudos sobre a interação da comunidade urbana com os peixes. Por exemplo, em bairros de baixa renda os praticantes de pesca esportiva tendem a consumir os peixes capturados em rios/riachos urbanos, o que representa um risco à saúde devido ao alto nível de contaminação da água (Pulford *et al.* 2017).

Ecologia de peixes de riacho *para* a cidade

O paradigma da ecologia *para* a cidade entende que a abordagem utilizada pela ecologia *na* e *da* cidade deve ser estendida para além do meio

acadêmico-científico. Este paradigma contempla a importância dos diferentes atores sociais (cidadãos, associações, agências governamentais e especialistas) na produção de conhecimento ecológico relevante para a cidade. Isto é, reconhece o meio urbano como um sistema sócio-ecológico onde o conhecimento científico se integra com os processos de tomada de decisão focados na governança ambiental e sustentabilidade urbana. A ecologia *para* a cidade conecta o conhecimento da ecologia *na* e *da* cidade com objetivos de integridade ambiental, igualdade social e viabilidade econômica para formulação de questões e apresentação de soluções. Neste paradigma, podem ser inseridos os estudos que exploram o uso dos peixes e sua eficiência na promoção de ações em saúde e bem-estar social das cidades. Por exemplo, envolver a comunidade na promoção e execução de programas de introdução de peixes para controle de mosquitos vetores do vírus da Dengue tem mostrado resultados positivos na redução do número de casos da virose (Morales-Pérez *et al.* 2017). Contudo, os prejuízos ecológicos causados pela introdução de peixes podem superar os benefícios do controle biológico (El-Sabaawi *et al.* 2016).

Os paradigmas da ecologia *na*, *da* e *para* a cidade interagem e se complementam

Os paradigmas apresentados surgiram em uma sequência histórica que expõe o desenvolvimento da disciplina da ecologia urbana desde seu surgimento (Pickett *et al.* 2016). A ecologia *na* cidade teve início nos anos de 1950 com os primeiros estudos em ambientes urbanos realizados na Ásia e Europa. Já a ecologia *da* cidade surge nos anos 1970 no Japão, mas só foi popularizada nos anos 1990. Enquanto a ecologia *para* a cidade reflete o amadurecimento mais recente da disciplina, sendo proposto a partir de 2015. Os três paradigmas seguem um contínuo de abordagem partindo de um modelo puramente ecológico (ecologia *na* cidade), passando por um modelo sócio-ecológico (ecologia *da* cidade), até chegar a um modelo de governança ambiental (ecologia *para* a cidade) (Figura 3). Este contínuo também implica em crescente complexidade nos tipos de interação e maior oportunidade de integração com as motivações e ações humanas. As relações ganham complexidade na medida

em que instituições, tomada de ação e estruturas urbanas são vistas como partes dinâmicas, não-lineares do mesmo sistema onde a governança ambiental coloca a responsabilidade da ciência no contexto da responsabilidade ambiental (Figura 3) (Pickett *et al.* 2016). Reconhecer a complementaridade das abordagens é fundamental para se estruturar estudos que forneçam evidências e permitam a construção das bases teóricas para avançar o conhecimento sobre os peixes de riacho em direção à ecologia *para* a cidade.

Teorias ecológicas atuais aplicadas aos riachos urbanos

A ecologia urbana tem se utilizado das teorias clássicas, desenvolvidas e testadas em ambientes não-urbanos, para estudar o fenômeno ecológico em sistemas urbanos. Contudo, os atributos e objetos estudados na ecologia urbana diferem profundamente daqueles estudados na ecologia tradicional (Forman 2016). Logo, pressupostos assumidos nas teorias clássicas podem não se aplicar ao ambiente urbano. Por exemplo, diversas teorias ecológicas fundamentais, como a teoria da competição no uso dos recursos (*Theory of Resource Competition*) (Tilman 1982, Grover 1997) e a teoria da evolução das características da história de vida (*Theory of Life History Evolution*) (Roff 1992, Stearns 1992) assumem que os recursos alimentares disponíveis no ambiente são estritamente limitados. Porém, atividades humanas, incluindo a urbanização, aumentam significativamente a disponibilidade de alimento no ambiente, o que pode levar ao relaxamento da competição e das trocas nutricionais (*trade-offs*) que definem as características de história de vida (Oro *et al.* 2013, Snell-Rood *et al.* 2015). Como isso afeta os peixes de riachos urbanos ainda é pouco conhecido. Um estudo recente sugere que a grande quantidade e qualidade de alimento em riachos urbanos relaxa *trade-offs* em guppies, permitindo aos indivíduos atingir maior tamanho, melhor condição e maior número de filhotes simultaneamente (Marques *et al.* 2020).

Amostragem de peixes em riachos urbanos

As técnicas utilizadas para amostragem de peixes em riachos urbanos são essencialmente as mesmas já utilizadas para peixes de riachos não-

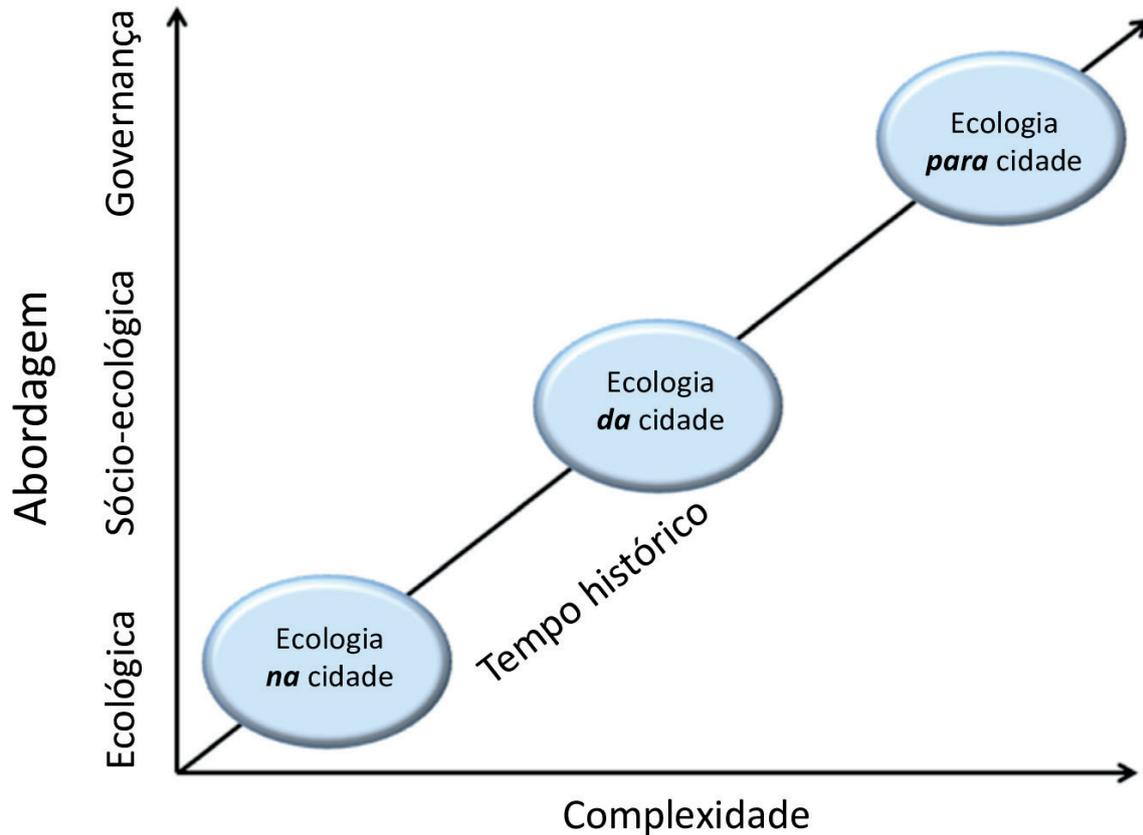


Figura 3. Contínuo de ordenação dos três paradigmas da ecologia urbana; ecologia na, da e para. Os paradigmas são organizados de acordo com o tempo histórico dos primeiros estudos, tipo de abordagem e complexidade. Adaptado de Pickett *et al.* (2016).

Figure 3. The different paradigms of urban ecology (ecology in, of, for the city) and their continuum. The paradigms are organized following time, type and complexity. Adapted from Pickett *et al.* (2016).

urbanos e exploradas em detalhe nos diferentes artigos dessa edição especial. Contudo, algumas vezes estas técnicas precisam ser adaptadas para o ambiente urbano. A seguir, destacamos algumas metodologias comumente utilizadas para amostragem de peixes de riacho que, com a nossa experiência, devem ser repensadas ou necessitam de adaptações para serem usadas nos riachos urbanos.

Equipamento de proteção individual

Riachos urbanos são altamente contaminados e oferecem risco à saúde humana. Por isso, medidas de proteção devem ser tomadas pelos pesquisadores. Equipamentos de proteção individual que evitem o contato direto com a água e protegem contra materiais perfurocortantes são necessários para a coleta em riachos urbanos. O uso de calças bota, luvas descartáveis longas (até os ombros), máscara e óculos de proteção são recomendados. Também

é importante a descontaminação de todo o material utilizado no trabalho de campo com desinfetante, para evitar o uso de materiais contaminados em riachos não-urbanos, e que pode introduzir patógenos.

Técnicas de captura

Uma das técnicas mais comuns para amostragem de peixes em riachos é a pesca elétrica (Mazzoni *et al.* 2000, Vehanen *et al.* 2013). Um importante aspecto da pesca elétrica é definir a extensão do riacho em que será realizada a coleta para garantir uma amostragem representativa da biodiversidade local (Hauer & Lamberti 2011, Terra *et al.* 2013). Entretanto, grandes extensões dos riachos urbanos correm no subterrâneo, restando apenas alguns trechos curtos à céu aberto. Nestes casos, amostragens em intervalos de tempo regulares (mensal, anual) no mesmo trecho podem ajudar a garantir que a biodiversidade de peixes nos riachos urbanos seja

bem representada.

Conservação de peixes em riachos urbanos

As profundas alterações que o processo urbanização impõe ao ecossistema dos riachos, podem levar o leitor a questionar a conservação de espécies nesses sistemas. De fato, existe uma discussão sobre a importância de se preservar a biodiversidade urbana (Dearborn & Kark 2010, Lepczyk *et al.* 2017, Aronson *et al.* 2017). Isso porque as cidades são vistas como áreas com fauna/flora depauperadas, ocupadas por espécies não-nativas e invasoras, com pouco interesse para conservação (Lepczyk *et al.* 2017). Contudo, as áreas urbanas são ocupadas por muitas espécies nativas, incluindo algumas espécies ameaçadas (Aronson *et al.* 2014, Ives *et al.* 2016). Além disso, a urbanização tem se expandido rapidamente, diminuindo a área não-urbana no mundo todo, mas principalmente em regiões que guardam grande biodiversidade (Seto *et al.* 2012, d'Amour *et al.* 2017). Portanto, pensar a conservação da biodiversidade urbana é fundamental para garantir a preservação de espécies aliada a um crescimento urbano ecologicamente responsável. Especificamente, a conservação dos riachos urbanos pode auxiliar na conexão da comunidade urbana com os ambientes aquáticos para promover a educação ambiental; no fornecimento de serviços ecossistêmicos como a redução de enchentes; na redução dos efeitos da ilha de calor urbana através da redução da temperatura local; e, na promoção do bem-estar e da saúde psicológica da comunidade urbana (Dearborn & Kark 2010).

A conservação dos peixes e demais organismos em riachos urbanos depende da mitigação dos efeitos da urbanização para garantir a saúde desses ecossistemas. Para isso, uma estratégia comum é a chamada restauração dos riachos urbanos (*urban stream restoration*) (Bain *et al.* 2014). Essa estratégia cria uma falsa impressão de que os riachos urbanos podem ser restaurados ao estado pré-urbanização, o que não é possível dada a irreversibilidade dos processos ecológicos alterados (Cockerill & Anderson 2014). Uma proposta alternativa tem sido a renovação de riachos urbanos (*urban stream renovation*), que incorpora objetivos ecológicos e sociais de curto e longo prazo para alcançar a mitigação do

efeito da urbanização nos riachos (Smith *et al.* 2016). Essa estratégia pode ser facilitada através da articulação das diferentes abordagens em ecologia urbana, com a SRU e seus efeitos sobre comunidades e populações. Torna-se claro que a SRU é primariamente controlada por fatores de desenvolvimento socioeconômico, sendo fundamental os estudos que utilizem uma abordagem sócio ecológica (ecologia “da” cidade) e de governança ambiental (ecologia “para” cidade) no intuito de aperfeiçoar ferramentas de avaliação de impactos, auxiliando tomadas de decisão frente os desafios para conservação das comunidades de peixes nestes ambientes (Figura 4).

CONCLUSÃO

Ao longo deste artigo mostramos que existem muitas lacunas no conhecimento sobre a ecologia dos peixes em riachos urbanos. Isso reflete o desenvolvimento recente da ecologia urbana como disciplina (Wu 2014). Mas também, é resultado da apatia dos pesquisadores que deliberadamente evitam estudos em sistemas urbanos, talvez por considerá-los indignos da pesquisa ecológica (McDonnell 2011). Portanto, um dos maiores desafios para o futuro da ecologia de peixes em riachos urbanos é sensibilizar pesquisadores sobre a importância do estudo da ecologia em áreas urbanas. A franca expansão da urbanização oferece cada vez mais riscos às áreas de conservação e às espécies nativas. Entender a ecologia urbana e manejar as cidades para comportar o maior número de espécies possível pode ser a estratégia mais importante para a manutenção da qualidade de vida das populações humanas nas próximas décadas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao programa CAPES-PrInt UERJ (88887.369182/2019-00) pela bolsa de pós-doutorado de PM. Agradecemos também aos pesquisadores e técnicos do LEP-UERJ e LEPI-UFPR pelo suporte durante o estudo.

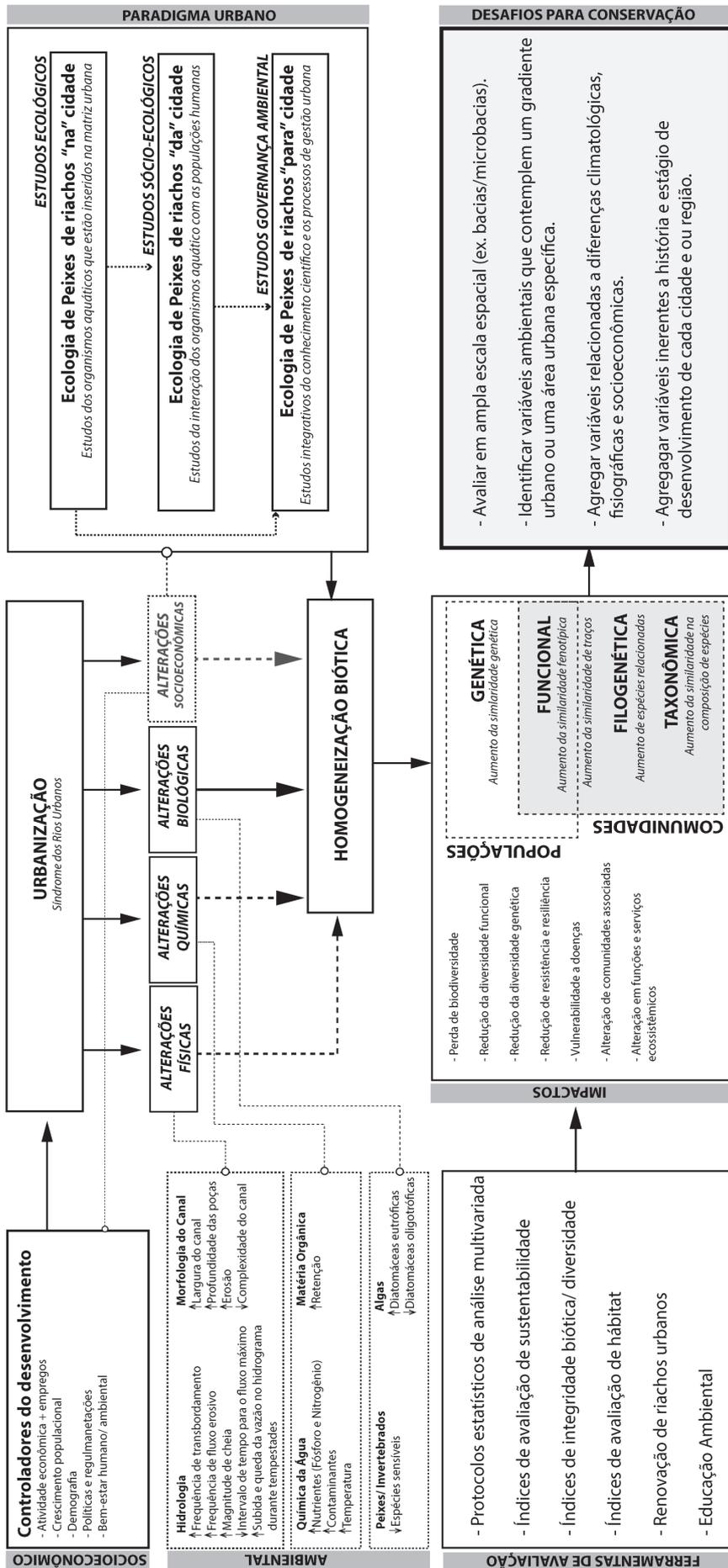


Figura 4. Mapa conceitual demonstrando a influência de aspectos socioeconômicos sobre a Síndrome dos Riachos Urbanos e consequentes alterações nos ecossistemas de riacho inerentes a aspectos físicos, químicos e biológicos. Destaca-se os novos paradigmas dentro da ecologia de riachos urbanos, bem como potenciais ferramentas de avaliação de impactos sobre a comunidade de peixes e os principais desafios para conservação.

Figure 4. Flowchart showing how socioeconomic factors interact with the components of the Urban Stream Syndrome and its consequences to instream physicochemical and biological variables. The different study paradigms, the tools for evaluating urban impacts and conservation challenges are highlighted.

REFERÊNCIAS

- Alberti, M. 2008. Advances in urban ecology: integrating humans and ecological processes in urban ecosystems. New York: Springer: p. 366.
- Alberti, M. 2015. Eco-evolutionary dynamics in an urbanizing planet. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(2), 114–126. DOI: 10.1016/j.tree.2014.11.007
- Alberti, M., Correa, C., Marzluff, J. M., Hendry, A. P., Palkovacs, E. P., Gotanda, K. M., Hunt, V. M., Apgar, T. M., & Zhou, Y. 2017a. Global urban signatures of phenotypic change in animal and plant populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 8951–8956. DOI: 10.1073/pnas.1606034114
- Alberti, M., Marzluff, J., & Hunt, V. M. 2017b. Urban driven phenotypic changes: empirical observations and theoretical implications for eco-evolutionary feedback. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1712), 20160029. DOI: 10.1098/rstb.2016.0029
- Allan, J. D. 2004. Landscapes and Riverscapes: The Influence of Land Use on Stream Ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35(1), 257–284. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122
- Aronson, M. F. J., La Sorte, F. A., Nilon, C. H., Katti, M., Goddard, M. A., Lepczyk, C. A., Warren, P. S., Williams, N. S. G., Cilliers, S., Clarkson, B., Dobbs, C., Dolan, R., Hedblom, M., Klotz, S., Kooijmans, J. L., Kuhn, I., MacGregor-Fors, I., McDonnell, M., Mortberg, U., Pysek, P., Siebert, S., Sushinsky, J., Werner, P., & Winter, M. 2014. A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1780), 20133330–20133330. DOI: 10.1098/rspb.2013.3330
- Aronson, M. F., Lepczyk, C. A., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., MacIvor, J. S., Nilon, C. H., & Vargo, T. 2017. Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(4), 189–196. DOI: 10.1002/fee.1480
- Azevedo-Santos, V. M., Vitule, J. R. S., Pelicice, F. M., García-Berthou, E., & Simberloff, D. 2017. Nonnative Fish to Control *Aedes* Mosquitoes: A Controversial, Harmful Tool. *BioScience*, 67(1), 84–90. DOI: 10.1093/biosci/biw156
- Bain, D. J., Copeland, E. M., Divers, M. T., Hecht, M., Hopkins, K. G., Hynicka, J., Koryak, M., Kostalos, M., Brown, L., Elliott, E. M., Fedor, J., Gregorich, M., Porter, B., Smith, B., Tracey, C., & Zak, M. 2014. Characterizing a major urban stream restoration project: Nine Mile Run (Pittsburgh, Pennsylvania, USA). *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(6), 1608–1621. DOI: 10.1111/jawr.12225
- Booth, D. B., Roy, A. H., Smith, B., & Capps, K. A. 2016. Global perspectives on the urban stream syndrome. *Freshwater Science*, 35(1), 412–420. DOI: 10.1086/684940
- Capps, K. A., Bentsen, C. N., & Ramírez, A. 2016. Poverty, urbanization, and environmental degradation: urban streams in the developing world. *Freshwater Science*, 35(1), 429–435. DOI: 10.1086/684945
- Carvalho, D. R. de, Flecker, A. S., Alves, C. B. M., Sparks, J. P., & Pompeu, P. S. 2019. Trophic responses to aquatic pollution of native and exotic livebearer fishes. *Science of The Total Environment*, 681, 503–515. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.092
- Clavel, J., Julliard, R., & Devictor, V. 2011. Worldwide decline of specialist species: toward a global functional homogenization? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(4), 222–228. DOI: 10.1890/080216
- Cockerill, K., & Anderson, W. P. 2014. Creating false images: stream restoration in an urban setting. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(2), 468–482. DOI: 10.1111/jawr.12131
- Cunico, A. M., Allan, J. D., & Agostinho, A. A. 2011. Functional convergence of fish assemblages in urban streams of Brazil and the United States. *Ecological Indicators*, 11(5), 1354–1359. DOI: 10.1016/j.ecolind.2011.02.009
- Cunico, A. M., Graça, W. J., Agostinho, A. A., Domingues, W. M., & Latini, J. D. 2009. Fish, Maringá Urban Streams, Pirapó river drainage, upper Paraná river basin, Paraná State, Brazil. *Check List*, 5(2), 273–280. DOI: 10.15560/5.2.273
- Cunico, A. M., & Gubiani, É. A. 2016. Effects of

- land use on sediment composition in low-order tropical streams. *Urban Ecosystems*, 20(2), 415–423. DOI: 10.1007/s11252-016-0603-8
- d'Amour, C. B., Reitsma, F., Baiocchi, G., Barthel, S., Güneralp, B., Erb, K.-H., Haberl, H., Creutzig, F., & Seto, K. C. 2017. Future urban land expansion and implications for global croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(34), 8939–8944. DOI: 10.1073/pnas.1606036114
- Dearborn, D. C., & Kark, S. 2010. Motivations for conserving urban biodiversity. *Conservation Biology*, 24(2), 432–440. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2009.01328.x
- Donihue, C. M., & Lambert, M. R. 2015. Adaptive evolution in urban ecosystems. *AMBIO*, 44(3), 194–203. DOI: 10.1007/s13280-014-0547-2
- El-Sabaawi, R. 2018. Trophic structure in a rapidly urbanizing planet. *Functional Ecology*, 32(7), 1718–1728. DOI: 10.1111/1365-2435.13114
- El-Sabaawi, R. W., Frauendorf, T. C., Marques, P. S., Mackenzie, R. A., Manna, L. R., Mazzoni, R., Phillip, D. A. T., Warbanski, M. L., & Zandonà, E. 2016. Biodiversity and ecosystem risks arising from using guppies to control mosquitoes. *Biology Letters*, 12(10), 20160590. DOI: 10.1098/rsbl.2016.0590
- Faeth, S. H., Bang, C., & Saari, S. 2011. Urban biodiversity: patterns and mechanisms. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1223(1), 69–81. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2010.05925.x
- Fernandes, R., Gomes, L. C., & Agostinho, A. A. 2003. Pesque-pague: negócio ou fonte de dispersão de espécies exóticas? Version 1. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 25(1), 115–120. DOI: 10.4025/actasciobiolsci.v25i1.2089
- Ferraz, J. D., Garcia, D. A. Z., Casimiro, A. C. R., Yabu, M. H. S., Geller, I. V., Magalhães, A. L. B., Vidotto-Magnoni, A. P., & Orsi, M. L. 2019. Descarte de peixes ornamentais em águas continentais brasileiras registrados no Youtube™: ausência de informação ou crime ambiental deliberado? *Revista Brasileira de Zootecias*, 20(2), 1–20. DOI: 10.34019/2596-3325.2019.v20.26202
- Fischer, J. D., Schneider, S. C., Ahlers, A. A., & Miller, J. R. 2015. Categorizing wildlife responses to urbanization and conservation implications of terminology: Terminology and urban conservation. *Conservation Biology*, 29(4), 1246–1248. DOI: 10.1111/cobi.12451
- Forman, R. T. T. 2016. Urban ecology principles: are urban ecology and natural area ecology really different? *Landscape Ecology*, 31(8), 1653–1662. DOI: 10.1007/s10980-016-0424-4
- Francis, R. A., & Chadwick, M. A. 2012. What makes a species synurbic? *Applied Geography*, 32(2), 514–521. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.06.013
- Francis, R. A., Chadwick, M. A., & Turbelin, A. J. 2019. An overview of non-native species invasions in urban river corridors. *River Research and Applications*, 1–10. DOI: 10.1002/rra.3513
- Grover, J. P. 1997. Resource competition. Springer Science & Business Media: p. 357.
- Hauer, F. R., & Lamberti, G. 2011. *Methods in Stream Ecology*. Academic Press: p. 894.
- Ives, C. D., Lentini, P. E., Threlfall, C. G., Ikin, K., Shanahan, D. F., Garrard, G. E., Bekessy, S. A., Fuller, R. A., Mumaw, L., Rayner, L., Rowe, R., Valentine, L. E., & Kendal, D. 2016. Cities are hotspots for threatened species: the importance of cities for threatened species. *Global Ecology and Biogeography*, 25(1), 117–126. DOI: 10.1111/geb.12404
- Johnson, M. T. J., & Munshi-South, J. 2017. Evolution of life in urban environments. *Science*, 358(6363), eaam8327. DOI: 10.1126/science.aam8327
- Johnson, R. C., Jin, H.-S., Carreiro, M. M., & Jack, J. D. 2013. Macroinvertebrate community structure, secondary production and trophic-level dynamics in urban streams affected by non-point-source pollution. *Freshwater Biology*, 58(5), 843–857. DOI: 10.1111/fwb.12090
- Kern, E. M. A., & Langerhans, R. B. 2018. Urbanization drives contemporary evolution in stream fish. *Global Change Biology*, 24(8), 3791–3803. DOI: 10.1111/gcb.14115
- Lawrence, C., Rutherford, N., Hamilton, R., & Meredith, D. 2016. Experimental evidence indicates that native freshwater fish outperform introduced *Gambusia* in mosquito suppression when water temperature is below 25°C. *Hydrobiologia*, 766(1), 357–364. DOI: 10.1007/s10750-015-2470-3
- Lepczyk, C. A., Aronson, M. F. J., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., & MacIvor, J.

- S. 2017. Biodiversity in the city: fundamental questions for understanding the ecology of urban green spaces for biodiversity conservation. *BioScience*, 67(9), 799–807. DOI: 10.1093/biosci/bix079
- Marchetti, M. P., Lockwood, J. L., & Light, T. 2006. Effects of urbanization on California's fish diversity: Differentiation, homogenization and the influence of spatial scale. *Biological Conservation*, 127(3), 310–318. DOI: 10.1016/j.biocon.2005.04.025
- Marques, P. S., Manna, L. R., Mazzoni, R., & El-Sabaawi, R. 2019. Intraspecific trait variation in urban stream ecosystems: toward understanding the mechanisms shaping urban stream communities. *Freshwater Science*, 000–000. DOI: 10.1086/701652
- Marques, P.S., Manna, L.R., Frauendorf, T.C., Zandonà, E., Mazzoni, R., & El-Sabaawi, R. 2020. Urbanization can increase the invasive potential of alien species. *Journal of Animal Ecology*, 89(10), 2345-2355.
- Mazzoni, R., Fenerich-Verani, N., & Caramaschi, E. P. 2000. Electrofishing as a sampling technique for coastal stream fish populations and communities in the Southeast of Brazil. *Revista Brasileira de Biologia*, 60(2), 205–216. DOI: 10.1590/S0034-71082000000200003
- McDonnell, M. J. 2011. The history of urban ecology. In: J. Niemelä (Ed.), *Urban ecology: patterns, processes, and applications*. Oxford University Press.
- McDonnell, M. J., & Hahs, A. K. 2013. The future of urban biodiversity research: moving beyond the 'low-hanging fruit.' *Urban Ecosystems*, 16(3), 397–409. DOI: 10.1007/s11252-013-0315-2
- McDonnell, M. J., & Hahs, A. K. 2015. Adaptation and adaptedness of organisms to urban environments. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46(1), 261–280. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-112414-054258
- McIntyre, N. E., Knowles-Yáñez, K., & Hope, D. 2008. Urban ecology as an interdisciplinary field: differences in the use of “urban” between the social and natural sciences. In: J. M. Marzluff, E. Shulenberger, W. Endlicher, M. Alberti, G. Bradley, C. Ryan, U. Simon, & C. ZumBrunnen (Eds.), *Urban Ecology*. pp. 49–65. Boston, MA: Springer US.
- McKinney, M. L. 2006. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 127(3), 247–260. DOI: 10.1016/j.biocon.2005.09.005
- McKinney, M. L., & Lockwood, J. L. 1999. Biotic homogenization: a few winners replacing many losers in the next mass extinction. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(11), 450–453. DOI: 10.1016/S0169-5347(99)01679-1
- McPhearson, T., Pickett, S. T. A., Grimm, N. B., Niemelä, J., Alberti, M., Elmqvist, T., Weber, C., Haase, D., Breuste, J., & Qureshi, S. 2016. Advancing urban ecology toward a science of cities. *BioScience*, 66(3), 198–212. DOI: 10.1093/biosci/biw002
- Moll, R. J., Cepek, J. D., Lorch, P. D., Dennis, P. M., Tans, E., Robison, T., Millspaugh, J. J., & Montgomery, R. A. 2019. What does urbanization actually mean? A framework for urban metrics in wildlife research. *Journal of Applied Ecology*, 56(5), 1289–1300. DOI: 10.1111/1365-2664.13358
- Morales-Pérez, A., Nava-Aguilera, E., Legorreta-Soberanis, J., Cortés-Guzmán, A. J., Balanzar-Martínez, A., Harris, E., Coloma, J., Alvarado-Castro, V.M., Bonilla-Leon, M.V., Morales-Nava, L., Ledogar, R. J., Cockcroft, A., & Andersson, N. 2017. “Where we put little fish in the water there are no mosquitoes:” a cross-sectional study on biological control of the *Aedes aegypti* vector in 90 coastal-region communities of Guerrero, Mexico. *BMC Public Health*, 17(S1), 433. DOI: 10.1186/s12889-017-4302-z
- Morse, C. C., Huryn, A. D., & Cronan, C. 2003. Impervious surface area as a predictor of the effects of urbanization on stream insect communities in Maine, U.S.A., 89, 95–127.
- Murphy, M. O., Agha, M., Maigret, T. A., Price, S. J., & Dorcas, M. E. 2016. The effects of urbanization on body size of larval stream salamanders. *Urban Ecosystems*, 19(1), 275–286. DOI: 10.1007/s11252-015-0486-0
- Nobile, A. B., Cunico, A. M., Vitule, J. R. S., Queiroz, J., Vidotto-Magnoni, A. P., Garcia, D. A. Z., Orsi, M. L., Lima, F. P., Acosta, A. A., da Silva, R. J., do Prado, F. D., Porto-Foresti, F., Brandão, H., Foresti, F., Oliveira, C., & Ramos, I. P. 2019. Status and recommendations for sustainable freshwater aquaculture in Brazil. *Reviews in Aquaculture*, raq.12393. DOI: 10.1111/raq.12393
- Olden, J. D. 2006. Biotic homogenization: a

- new research agenda for conservation biogeography. *Journal of Biogeography*, 33(12), 2027–2039. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2006.01572.x
- Oro, D., Genovart, M., Tavecchia, G., Fowler, M. S., & Martínez-Abraín, A. 2013. Ecological and evolutionary implications of food subsidies from humans. *Ecology Letters*, 16(12), 1501–1514. DOI: 10.1111/ele.12187
- Padayachee, A. L., Irlich, U. M., Faulkner, K. T., Gaertner, M., Procheş, Ş., Wilson, J. R. U., & Rouget, M. 2017. How do invasive species travel to and through urban environments? *Biological Invasions*, 19(12), 3557–3570. DOI: 10.1007/s10530-017-1596-9
- Parr, T. B., Smucker, N. J., Bentsen, C. N., & Neale, M. W. 2016. Potential roles of past, present, and future urbanization characteristics in producing varied stream responses. *Freshwater Science*, 35(1), 436–443. DOI: 10.1086/685030
- Pereira, A. L., Ribeiro, V. R., Gubiani, E. A., Zacarkim, C. E. & Cunico, A. M. 2014. Ichthyofauna of urban streams in the western region of Paraná State, Brazil. *Check List*, 10(3), 550–555. DOI: 10.15560/10.3.550
- Peressin, A., Goncalves, C. da S., & Cetra, M. 2018. Ichthyofauna diet changes in response to urbanization: the case of upper Paranapanema River basin (Brazil). *Urban Ecosystems*, 21(4), 795–803. DOI: 10.1007/s11252-018-0755-9
- Petsch, D. K. 2016. Causes and consequences of biotic homogenization in freshwater ecosystems: biotic homogenization of freshwater systems. *International Review of Hydrobiology*, 101(3–4), 113–122. DOI: 10.1002/iroh.201601850
- Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L., Childers, D. L., McDonnell, M. J., & Zhou, W. 2016. Evolution and future of urban ecological science: ecology *in, of, and for* the city. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2(7), e01229. DOI: 10.1002/ehs2.1229
- Pulford, E., Polidoro, B. A., & Nation, M. 2017. Understanding the relationships between water quality, recreational fishing practices, and human health in Phoenix, Arizona. *Journal of Environmental Management*, 199, 242–250. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.046
- Ramírez, A., De Jesús-Crespo, R., Martínó-Cardona, D. M., Martínez-Rivera, N., & Burgos-Caraballo, S. 2009. Urban streams in Puerto Rico: what can we learn from the tropics? *Journal of the North American Benthological Society*, 28(4), 1070–1079. DOI: 10.1899/08-165.1
- Ramírez, A., Rosas, K. G., Lugo, A. E., & Ramos-González, O. M. 2014. Spatio-temporal variation in stream water chemistry in a tropical urban watershed. *Ecology and Society*, 19(2).
- Roff, D. A. 1992. *The evolution of life histories: theory and analysis*. New York: Chapman and Hal.
- Seng, C. M., Setha, T., Nealon, J., Socheat, D., Chantha, N., & Nathan, M. B. 2008. Community-based use of the larvivorous fish *Poecilia reticulata* to control the dengue vector *Aedes aegypti* in domestic water storage containers in rural Cambodia. *Journal of Vector Ecology*, 33(1), 139–144. DOI: <https://doi.org/cqjcwj>
- Seto, K. C., Guneralp, B., & Hutyra, L. R. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083–16088. DOI: 10.1073/pnas.1211658109
- Shochat, E., Lerman, S. B., Anderies, J. M., Warren, P. S., Faeth, S. H., & Nilon, C. H. 2010. Invasion, competition, and biodiversity loss in urban ecosystems. *BioScience*, 60(3), 199–208. DOI: 10.1525/bio.2010.60.3.6
- Smith, R. F., Hawley, R. J., Neale, M. W., Vietz, G. J., Diaz-Pascacio, E., Herrmann, J., Lovell, A. C., Prescott, C., Rios-Touma, B., Smith, B., & Utz, R. M. 2016. Urban stream renovation: incorporating societal objectives to achieve ecological improvements. *Freshwater Science*, 35(1), 364–379. DOI: 10.1086/685096
- Snell-Rood, E., Cothran, R., Espeset, A., Jeyasingh, P., Hobbie, S., & Morehouse, N. I. 2015. Life-history evolution in the anthropocene: effects of increasing nutrients on traits and trade-offs. *Evolutionary Applications*, 8(7), 635–649. DOI: 10.1111/eva.12272
- Stearns, S. C. 1992. *The evolution of life histories*. 1 edition 1 edition ed. Oxford; New York: Oxford University Press: p. 262.
- Strecker, A. L., Campbell, P. M., & Olden, J. D. 2011.

- The aquarium trade as an invasion pathway in the Pacific Northwest. *Fisheries*, 36(2), 74–85. DOI: 10.1577/03632415.2011.10389070
- Terra, B. F., Hughes, R. M., & Araújo, F. G. 2013. Sampling sufficiency for fish assemblage surveys of tropical atlantic forest streams, Southeastern Brazil. *Fisheries*, 38(4), 150–158. DOI: 10.1080/03632415.2013.775572
- Tilman, D. 1982. Resource competition and community structure. Princeton University Press: p. 312.
- Tuckett, Q. M., Ritch, J. L., Lawson, K. M., & Hill, J. E. 2017. Landscape-scale survey of non-native fishes near ornamental aquaculture facilities in Florida, USA. *Biological Invasions*, 19(1), 223–237. DOI: 10.1007/s10530-016-1275-2
- Turrini, T., & Knop, E. 2015. A landscape ecology approach identifies important drivers of urban biodiversity. *Global Change Biology*, 21(4), 1652–1667. DOI: 10.1111/gcb.12825
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2019. World urbanization prospects: the 2018 revision (ST/ESA/SER.A/420).
- Vehanen, T., Sutela, T., Jounela, P., Huusko, A., & Mäki-Petäys, A. 2013. Assessing electric fishing sampling effort to estimate stream fish assemblage attributes. *Fisheries Management and Ecology*, 20(1), 10–20. DOI: 10.1111/j.1365-2400.2012.00859.x
- Vietz, G. J., Rutherford, I. D., Fletcher, T. D., & Walsh, C. J. 2016. Thinking outside the channel: challenges and opportunities for protection and restoration of stream morphology in urbanizing catchments. *Landscape and Urban Planning*, 145, 34–44. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.09.004
- Vitule, J. R. S., & Pozenato, L. P. 2012. Homogeneização biótica: Misturando organismos em um mundo pequeno e globalizado. *Estudos de Biologia*, 34(83). DOI: 10.7213/estud.biol.7336
- Walsh, C. J., Booth, D. B., Burns, M. J., Fletcher, T. D., Hale, R. L., Hoang, L. N., Livingston, G., Rippey, M. A., Roy, A. H., Scoggins, M., & Wallace, A. 2016. Principles for urban stormwater management to protect stream ecosystems. *Freshwater Science*, 35(1), 398–411. DOI: 10.1086/685284
- Walsh, C. J., Fletcher, T. D., & Burns, M. J. 2012. Urban stormwater runoff: a new class of environmental flow problem. *PLoS ONE*, 7(9), e45814. DOI: 10.1371/journal.pone.0045814
- Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan, R. P. 2005. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 706–723. DOI: 10.1899/04-028.1
- Wang, L., Lyons, J., Kanehl, P., & Bannerman, R. 2001. Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales. *Environmental Management*, 28(2), 255–266. DOI: 10.1007/s0026702409
- Wu, J. 2014. Urban ecology and sustainability: the state-of-the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 125, 209–221. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.01.018
- Zhou, W., Pickett, S. T. A., & Cadenasso, M. L. 2017. Shifting concepts of urban spatial heterogeneity and their implications for sustainability. *Landscape Ecology*, 32(1), 15–30. DOI: 10.1007/s10980-016-0432-4

Submitted: 12 June 2020

Accepted: 15 March 2021

*Associate Editors: Érica Pellegrini Caramaschi,
Rosana Mazzoni
e Rafael Pereira Leitão*