

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 28/09/2025.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE

Distúrbios afetam metacomunidades aquáticas dependendo da estrutura espacial e da intensidade de dispersão

Camila Batista Vieira

**Rio Claro – SP
2024**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE

Distúrbios afetam metacomunidades aquáticas dependendo da estrutura espacial e da intensidade de dispersão

Camila Batista Vieira

Tese apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ecologia e Biodiversidade.

Orientador: Tadeu de Siqueira Barros

**Rio Claro – SP
2024**

V658d Vieira, Camila Batista
Distúrbios afetam metacomunidades aquáticas dependendo da
estrutura espacial e da intensidade de dispersão / Camila Batista
Vieira. -- Rio Claro, 2024
104 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Biociências, Rio Claro,
Orientador: Tadeu de Siqueira Barros

1. Ecologia de Metacomunidade. 2. Comunidades aquáticas. 3.
Diversidade ecológica. 4. Distúrbios. 5. Experimento manipulativo. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Distúrbios afetam metacomunidades aquáticas dependendo da estrutura espacial e da intensidade de dispersão

AUTORA: CAMILA BATISTA VIEIRA

ORIENTADOR: TADEU DE SIQUEIRA BARROS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ecologia e Biodiversidade, área: Biodiversidade pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. TADEU DE SIQUEIRA BARROS (Participação Virtual)
Departamento de Biodiversidade / Unesp - IB Rio Claro



Prof. Dr. LUIS CESAR SCHIESARI (Participação Virtual)
Escola de Artes, Ciências e Humanidades / Universidade de São Paulo

Profa. Dra. FABIANA SCHNECK (Participação Virtual)
Instituto de Ciências Biológicas / Universidade Federal do Rio Grande

Profa. Dra. CARYNE APARECIDA DE CARVALHO BRAGA (Participação Virtual)
Laboratório de Ciências Ambientais / Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Dr. GABRIEL LOURENÇO BREJÃO (Participação Virtual)

x

Rio Claro, 28 de setembro de 2023

Dedico esta tese a minha mãe
e a minha irmã

Agradecimentos

Ao Tadeu, meu orientador, muito obrigada!

À minha mãe, Altina, e minha irmã, Thaís, meu cunhado, Gustavo, e à minha família, muito obrigada!

Aos amigos e a todos aqueles que estiveram e contribuíram comigo, muito obrigada!

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

À FAPESP - processo nº 2021/00619-7, processo nº 2019/06291-3, processo nº 2015/18790-3, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro à pesquisa.

À Fundação Rufford - processo nº 26823-1, pelo apoio financeiro à pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Universal CNPq 409215/2018-0, pelo apoio financeiro.

"O Professor Girafales questionou:
'Digamos que eu tenha quatro laranjas e
coma uma.
Quantas me restam?'

Ao que Chaves prontamente
respondeu: 'Bom, eu sabia que isso era
com maçãs.'"

Resumo

Um dos desafios atuais da ecologia é compreender os efeitos de distúrbios antrópicos nas comunidades biológicas em diferentes escalas. Através de experimentos simulando distúrbios em metacomunidades planctônicas com o pesticida agrícola fipronil, revelamos que a contaminação por agrotóxicos impacta a estrutura e reorganização das comunidades aquáticas em níveis local e regional. Investigamos as respostas de comunidades e metacomunidades ao pesticida para entender como a contaminação e a dispersão afeta a diversidade e a dinâmica das metacomunidades. As metacomunidades perturbadas pelo pesticida responderam de maneira distinta de acordo com grupos biológicos, dispersão e estruturas espaciais de contaminação ao longo do tempo. Observamos um aumento na diversidade beta em metacomunidades poluídas, refletindo maior variação na abundância e incidência das espécies ao longo do tempo. Trajetórias temporais e espaciais da composição das espécies foram sincronizadas nas comunidades totalmente poluídas, destacando a capacidade de algumas comunidades-chave compensarem os efeitos de distúrbios em escala regional. Contudo, nossa análise sobre o papel da dispersão demonstrou que, embora ela tenha afetado a estrutura das metacomunidades aquáticas após o distúrbio, essa influência não foi suficiente para provocar uma mudança significativa nos efeitos da contaminação. Demonstramos a importância de abordagens integrativas em diferentes escalas para compreender os impactos de distúrbios na diversidade e composição das comunidades. Encontramos que diferentes distúrbios e fatores ambientais influenciam a reorganização de metacomunidades, ressaltando a importância de abordagens integrativas para compreender a dinâmica das comunidades em diversas escalas. Além disso, destacamos o potencial de novas abordagens para melhorar nossa compreensão das mudanças na estrutura das comunidades local e regionalmente, especialmente em relação às modificações no ambiente causadas por ações antrópicas.

Palavras-chave: metacomunidade, experimento manipulativo, distúrbios, biodiversidade, agrotóxicos, comunidades-chave, intensidade de dispersão, estrutura espacial.

Abstract

One of the current challenges in Ecology is understanding how anthropogenic disturbances, such as the use of agricultural pesticides, impact biological communities at different scales. Our experiments simulating disturbances in planktonic metacommunities revealed that pesticide contamination significantly influences the structure and reorganization of aquatic communities at both local and regional levels. As we investigated community and metacommunity responses to the pesticide, we observed distinct reactions among biological groups, dispersal patterns, and spatial structures of contamination over time. In polluted metacommunities, there was a noticeable increase in beta diversity, indicating greater variation in species abundance and incidence over time. Interestingly, temporal and spatial trajectories of species composition were synchronized in fully polluted communities, underscoring the contribution of certain key communities to compensate for the effects of regional-scale disturbances. However, our analysis of the role of dispersal showed that, while it affected the structure of aquatic metacommunities post-disturbance, its influence was not sufficient to cause a significant change in the effects of contamination. This study emphasizes the importance of integrative approaches at different scales for understanding the impacts of disturbances on community diversity and composition. We found that different disturbances and environmental factors influence the reorganization of metacommunities, highlighting the need for integrative approaches to comprehend community dynamics at various scales. Furthermore, our results suggest potential avenues for further research to improve our understanding of changes in community structure, both locally and regionally, especially in the context of modifications to the environment resulting from anthropogenic actions.

Keywords: metacommunity, manipulative experiment, disturbances, biodiversity, pesticides, keystone communities, dispersal intensity, spatial structure.

Sumário

1. Introdução	7
1.1 Introdução geral	7
1.2 Estrutura da tese.....	12
Referências.....	14
2. Capítulo 1.....	23
2.1 Resumo.....	24
2.2 Introdução	25
2.3 Material e métodos	28
2.4 Resultados	36
2.5 Discussão	45
Referências.....	50
Material Suplementar	57
3. Capítulo 2.....	62
3.1 Resumo.....	63
3.2 Introdução	65
3.3 Material e métodos	69
3.5 Resultados	75
3.6 Discussão	86
Referências.....	90
Material Suplementar	97
4. Considerações finais.....	99

1. Introdução

1.1 Introdução geral

Em meio à crescente degradação de ecossistemas em escala global, a compreensão dos processos ecológicos que moldam a dinâmica de comunidades e conjuntos de comunidades (metacomunidades) representa um dos principais desafios da Ecologia. A estrutura interna de metacomunidades é definida pela forma como as comunidades locais estão conectadas pela dispersão e pela influência de processos locais abióticos e bióticos (Leibold e Chase 2018, Galvez et al. 2023). As espécies são adicionadas às comunidades por meio de especiação e dispersão, com suas abundâncias relativas moldadas por seleção, deriva e dispersão (Vellend, 2010). A dispersão influencia a diversidade local e regional pois permite a chegada de novas espécies a uma localidade, mantém a diversidade compensando as extinções locais, ao mesmo tempo em que promove a troca de espécies entre diferentes comunidades (Leibold et al. 2022). Já a deriva promove mudanças aleatórias na abundância das espécies em comunidades locais através de processos demográficos independentes (Vellend, 2010). A seleção afeta a dinâmica de comunidades através de interações intra e interespecífica e diferenças nos nichos ecológicos das espécies, que determinam quais espécies persistem em cada comunidade local (Holt et al. 2005, Leibold et al. 2004). Distúrbios ambientais como poluição podem modificar os processos de seleção e dispersão em metacomunidades, alterando a dinâmica e estrutura e a composição das comunidades locais e a diversidade de espécies nas comunidades. Isso acontece devido ao aumento da mortalidade, resultando na redução de suas populações e na capacidade de colonização de novos habitats após um distúrbio (Urban et al. 2008, Leibold et al. 2022, Vad et al. 2022).

Diante de distúrbios ambientais, algumas comunidades podem exercer papel desproporcional na dinâmica regional de metacomunidades. O conceito de espécie-chave descreve que algumas espécies têm um impacto desproporcional em uma comunidade ou ecossistema específico, apesar de sua abundância ou biomassa relativa (Paine, 1966). Já o conceito de comunidade-chave amplia essa ideia de espécies-chave para considerar que uma ou mais comunidades afetam desproporcionalmente a metacomunidade (Mouquet et al. 2013). A presença dessas comunidades-chave afeta outras comunidades locais conectadas a elas, mudando as interações ecológicas, a composição de espécies e influenciando a estrutura e o funcionamento da metacomunidade (Resetarits et al. 2018, Yang et al. 2020). Essas comunidades-chave também podem afetar a resiliência e estabilidade de outras comunidades dentro da metacomunidade ao promover a recolonização por novas espécies (Ruhí et al. 2017, Ceron et al. 2020, Valente-Neto et al. 2020).

A poluição é um dos principais problemas ambientais que afetam negativamente os ecossistemas aquáticos (Amoatey e Baawain 2019, Sharma et al. 2019). Dentre os principais efeitos negativos que a poluição pode ter está a redução na diversidade de espécies, mudanças na composição das comunidades e nas interações ecológicas (Becker et al. 2020, Estrada-Carmona et al. 2022, Jaureguiberry et al. 2022, Oakley e Bicknell 2022). Uma das principais fontes de poluição de ecossistemas aquáticos é a agricultura intensiva (Tilman et al. 2002, Stoyanova e Harizanova, 2019, Wato e Amare 2020). Com o objetivo de aumentar sua produtividade, a agricultura intensiva estimula o crescimento do desmatamento para expandir suas áreas de cultivo (Weatherhead e Howden 2009, Jaureguiberry et al. 2022). Agrotóxicos são intensamente utilizados pela agricultura para aumentar a produção agrícola, mas o seu escoamento das áreas de cultivo para os corpos d'água

causa impactos ambientais como a poluição aquática (Tilman et al. 2002, Jaureguiberry et al. 2022, Pelison et al. 2023). Os principais impactos ambientais da poluição de ecossistemas aquáticos pela agricultura intensiva são a degradação da qualidade da água, a perda de biodiversidade aquática, a redução dos serviços ecossistêmicos, a eutrofização de rios e lagos e a contaminação de aquíferos subterrâneos (Tilman et al. 2002, Cook et al. 2018, Wato e Amare 2020, Estrada-Carmona et al. 2022, Schiesari et al. 2023).

Pesticidas são tóxicos para organismos aquáticos, além de representarem riscos à saúde humana (Rohr e Crumrine 2005, Kasai et al. 2016, Wato e Amare 2020, Kumar et al. 2021). Espécies sensíveis à poluição por pesticidas em ambientes aquáticos podem sofrer reduções em suas abundâncias, e em situações extremas, serem extintas localmente (Stampfli et al. 2011, Cook et al. 2018, Amoatey e Baawain 2019, Sharma et al. 2019, Kaarlejärvi et al. 2021, Oakley e Bicknell 2022). Por outro lado, espécies que apresentam maior resistência aos efeitos negativos da poluição podem aumentar em abundância (Lim et al. 1984, Brans et al. 2021), através de estratégias de sobrevivência e adaptação contra adversidades ambientais (Radzikowski 2013). Por exemplo, os cladóceros em condições adversas produzem ovos de resistência como uma estratégia para garantir a sobrevivência da espécie em momentos de estresse (Fryer 1996, Brendonck e Meester 2003). Quando em condições ambientais melhores, esses ovos de resistência podem eclodir, dando origem a novos indivíduos que irão repovoar a área e reestabelecer a população. Essas repostas diferenciadas entre espécies devem levar a uma mudança na composição de comunidades aquáticas poluídas. Mais especificamente, um distúrbio por poluente pode selecionar as mesmas espécies em diferentes locais, diminuindo a variabilidade espacial e temporal na composição de espécies das comunidades

(Stampfli et al. 2011, Karp et al. 2012, Socolar et al. 2016, Cook et al. 2018, Liess et al. 2019, Durán et al. 2020, Oakley e Bicknell 2022).

O fipronil é um pesticida químico, com função de inseticida usado na agricultura para controle ou eliminação de pragas agrícolas (Chanton et al. 2001, Aajoud et al. 2003, Mandal e Singh 2014). Fipronil é amplamente utilizado na produção de cana-de-açúcar (Macedo et al. 2012, Christofolletti et al. 2017) e apresenta um grande potencial para provocar impactos negativos em muitos organismos aquáticos (Bejarano et al. 2005, Kasai et al. 2016, Miller et al. 2020, Becker et al. 2020). O fipronil atua no sistema nervoso inibindo a transmissão sináptica ao alterar as funções dos receptores do ácido gama-aminobutírico (GABA), que regulam o fluxo de íons de cloro através da membrana das células nervosas (Cintra-Socolowski et al. 2015). Quando o fipronil bloqueia a transmissão sináptica ocorre hiperexcitação das células nervosas que leva a convulsões e paralisia do sistema nervoso central (SNC), resultando na morte do organismo afetado (El Hassani et al. 2005). Devido ao seu efeito pesticida, o fipronil pode causar um aumento da mortalidade dos consumidores primários em ecossistemas aquáticos lênticos, representados predominantemente por espécies zooplanctônicas (Hayasaka et al. 2014, Kasai et al. 2016, Miller et al. 2020).

Os efeitos da poluição nos ecossistemas aquáticos podem ser investigados em comunidades zooplanctônicas. As espécies de zooplâncton são importantes convertendo energia e nutrientes da produção primária para os organismos de níveis tróficos superiores na cadeia alimentar aquática (Soranno et al. 1993). Além disso, o ciclo de vida curto das espécies zooplanctônicas permite que elas respondam rapidamente às mudanças experimentais ou condições ambientais (Miller et al. 2020). Devido à diversidade de espécies com características distintas, as espécies de zooplâncton tendem a ser mais sensíveis às mudanças nos ecossistemas aquáticos

ao longo do espaço e do tempo (Leibold 1999, Dodson et al. 2000). Experimentos com comunidades de zooplâncton podem permitir estudar processos ecológicos em ecossistemas aquáticos, fornecendo informações importantes sobre a dinâmica das populações, cadeias alimentares e respostas a mudanças ambientais.

Experimentos com comunidades de zooplâncton em mesocosmos podem servir para investigar como a estrutura de metacomunidades muda após um distúrbio. Os experimentos com mesocosmos podem contribuir para investigar como o escoamento de pesticidas da paisagem terrestre para ecossistemas aquáticos afeta comunidades e metacomunidades aquáticas. Mesocosmos são ambientes controlados que simulam condições naturais, permitem manipular e isolar variáveis específicas para entender melhor seus efeitos em um sistema biológico (Benton et al. 2007). Experimentos em mesocosmos possibilitam avaliar as respostas das espécies de zooplâncton a diferentes condições ambientais (Soranno et al. 1993, Brown et al. 2015, Miller et al. 2020). Além disso, experimentos permitem replicar condições, o que pode aumentar nossa compreensão da distribuição das espécies em diferentes comunidades locais (Sharma et al. 2020), e como a dispersão afeta essas distribuições em uma metacomunidade (Yang et al. 2020).

1.2 Estrutura da tese

Na minha tese busquei entender como metacomunidades aquáticas se reorganizam frente a distúrbios. A tese tem dois capítulos baseados em experimentos manipulativos. Especificamente, no capítulo 1 manipulamos experimentalmente metacomunidades zooplanctônicas em mesocosmos e usamos o pesticida fipronil para simular distúrbios ambientais, com foco em compreender como processos ecológicos moldam comunidades biológicas em diferentes escalas após distúrbios causados por atividades humanas, como a poluição em ecossistemas aquáticos. Nossa hipótese era que a estrutura espacial das metacomunidades poderia amenizar os efeitos da contaminação das comunidades e das metacomunidades ao longo do tempo após um distúrbio. Avaliamos como a poluição resulta em distúrbios que impactam a diversidade e a composição de espécies. Investigamos variações na composição, abundância, sincronia espacial e mecanismos temporais de mudança das comunidades aquáticas contaminadas. Em específico, avaliamos se a seleção de espécies tolerantes a poluentes causa reorganização das comunidades, levando a mudanças na diversidade beta e gama. Testamos se comunidades-chave surgem como componentes essenciais para a dinâmica regional, influenciando outras comunidades e contribuindo para a estabilidade de metacomunidades parcialmente poluídas.

No capítulo 2, realizamos um experimento com metacomunidades de zooplâncton para testar como diferentes intensidades de dispersão influenciam as dinâmicas espaciais e temporais das populações e comunidades em um gradiente de poluição por fipronil. Nossa principal hipótese era que a intensidade da dispersão mudaria o efeito da contaminação promovida pela poluição das metacomunidade, influenciando a estrutura das comunidades em diferentes escalas. Ou seja, em

condições de baixa dispersão os colonizadores teriam dificuldade em chegar a habitats adequados, tornando o efeito da estrutura espacial da contaminação determinante das espécies que colonizam as comunidades. Em condições de dispersão intermediária, os indivíduos poderiam se mover e colonizar diferentes locais que se adequam às suas necessidades ecológicas, e isso diminuiria o efeito da estrutura espacial da contaminação. Já o aumento das taxas de dispersão facilitaria a chegada de colonizadores em habitats, o que poderia reduzir ou não mudar a importância da estrutura espacial da contaminação. Deste modo, avaliamos se o impacto da poluição por atividades agrícolas e sua influência nas comunidades dependem da estrutura espacial da contaminação e da intensidade de dispersão na paisagem. Fizemos isso para entender se a intensidade de dispersão entre locais é um mecanismo chave que modula a resposta das espécies aos distúrbios, amplificando ou atenuando os efeitos da poluição.

Referências

- Aajoud, A., Ravanel, P. and Tissut, M. 2003. Fipronil metabolism and dissipation in a simplified aquatic ecosystem. - Journal of Agricultural and Food Chemistry 51: 1347–1352.
- Amoatey, P. and Baawain, M. S. 2019. Effects of pollution on freshwater aquatic organisms. - Water Environment Research 91: 1272–1287.
- Becker, J. M., Russo, R., Shahid, N. and Liess, M. 2020. Drivers of pesticide resistance in freshwater amphipods. - Science of The Total Environment 735: 139264.
- Bejarano, A. C., Chandler, G. T. and Decho, A. W. 2005. Influence of natural dissolved organic matter (DOM) on acute and chronic toxicity of the pesticides chlorothalonil, chlorpyrifos and fipronil on the meiobenthic estuarine copepod *Amphiascus tenuiremis*. - Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 321: 43–57.
- Benton, T. G., Solan, M., Travis, J. M. J. and Sait, S. M. 2007. Microcosm experiments can inform global ecological problems. - Trends in Ecology and Evolution 22: 516–521.
- Brans, K. I., Almeida, R. A. and Fajgenblat, M. 2021. Genetic differentiation in pesticide resistance between urban and rural populations of a nontarget freshwater keystone interactor, *Daphnia magna*. - Evolutionary Applications 14: 2541–2552.
- Brendonck, L. and De Meester, L. 2003. Egg banks in freshwater zooplankton: evolutionary and ecological archives in the sediment. - Hydrobiologia 491: 65–84.

- Brown, B. L., Downing, A. L. and Leibold, M. A. 2016. Compensatory dynamics stabilize aggregate community properties in response to multiple types of perturbations.
- Brown, B. L., Swan, C. M., Auerbach, D. A., Campbell Grant, E. H., Hitt, N. P., Maloney, K. O. and Patrick, C. 2011. Metacommunity theory as a multispecies, multiscale framework for studying the influence of river network structure on riverine communities and ecosystems. - Journal of the North American Benthological Society 30: 310–327.
- Ceron, K., Santana, D. J. and Valente-Neto, F. 2020. Seasonal patterns of ecological uniqueness of anuran metacommunities along different ecoregions in Western Brazil. - PLoS ONE 15: 1–14.
- Chanton, P. F.; Ravanel, P.; Tissut, M.; Meyran, J. C. Toxicity and bioaccumulation of fipronil in the nontarget arthropodan fauna associated with subalpine mosquito breeding. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 52, p. 8-12, 2001.
- Christofoletti, C. A., Escher, J. P., Correia, J. E., Marinho, J. F. U. and Fontanetti, C. S. 2013. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. - Waste Management 33: 2752–2761.
- Christofoletti, C.A. et al. 2017. O emprego de agrotóxicos na cultura de cana-de-açúcar. Oikos (51).
- Cintra-Socolowski, P., Roat, T. C., Nocelli, R. C., Nunes, P. H., Ferreira, R. A., Malaspina, O. and Bueno, O. C. 2016. Sublethal doses of fipronil intensify synapsin immunostaining in *Atta sexdens rubropilosa* (Hymenoptera: Formicidae)

brains: Fipronil intensify synapsin immunostaining in brains of ants. - Pest. Manag. Sci. 72: 907–912.

Cook, S. C., Housley, L., Back, J. A. and King, R. S. 2018. Freshwater eutrophication drives sharp reductions in temporal beta diversity. - Ecology 99: 47–56.

Dodson, S. I. Arnott, S. E. & Cottingham, K. L. 2000. The relationship in lake communities between primary productivity and species richness. Ecology, 81(10), 2662-2679.

Durán, A. P., Green, J. M. H., West, C. D., Visconti, P., Burgess, N. D., Virah-Sawmy, M. and Balmford, A. 2020. A practical approach to measuring the biodiversity impacts of land conversion (R Freckleton, Ed.). - Methods Ecol Evol 11: 910–921.

El Hassani, A. K., Dacher, M., Gauthier, M. and Armengaud, C. 2005. Effects of sublethal doses of fipronil on the behavior of the honeybee (*Apis mellifera*). - Pharmacology Biochemistry and Behavior 82: 30–39.

Estrada-Carmona, N., Sánchez, A. C., Remans, R. and Jones, S. K. 2022. Complex agricultural landscapes host more biodiversity than simple ones: A global meta-analysis. - Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 119: e2203385119.

Fryer, G. 1996. Diapause, a potent force in the evolution of freshwater crustaceans.: 14.

Gálvez, Á. et al. 2023. Inconsistent response of taxonomic groups to space and environment in mediterranean and tropical pond metacommunities. - Ecology, v. 104, n. 1, p. e3835.

- Grainger, T. N. and Gilbert, B. 2016. Dispersal and diversity in experimental metacommunities: linking theory and practice. - *Oikos* 125: 1213–1223.
- Hayasaka, D. 2014. Study of the impacts of systemic insecticides and their environmental fate in aquatic communities of paddy mesocosms. - *Journal of Pesticide Science* 39: 172–173.
- Holyoak, M. Leibold, M. A. & Holt, R. D. 2005. *Metacommunities: Spatial Dynamics and Ecological Communities*. - University of Chicago Press.
- Jaureguiberry, P., Titeux, N., Wiemers, M., Bowler, D. E., Coscieme, L., Golden, A. S., Guerra, C. A., Jacob, U., Takahashi, Y., Settele, J., Díaz, S., Molnár, Z. and Purvis, A. 2022. The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. - *Sci. Adv.* 8: eabm9982.
- Kaarlejärvi, E., Salemaa, M., Tonteri, T., Merilä, P. and Laine, A. 2021. Temporal biodiversity change following disturbance varies along an environmental gradient (M Fortin, Ed.). - *Global Ecol. Biogeogr.* 30: 476–489.
- Karp, D. S., Rominger, A. J., Zook, J., Ranganathan, J., Ehrlich, P. R. and Daily, G. C. 2012. Intensive agriculture erodes β -diversity at large scales (H Cornell, Ed.). - *Ecol Lett* 15: 963–970.
- Kasai, A., Hayashi, T. I., Ohnishi, H., Suzuki, K., Hayasaka, D. and Goka, K. 2016. Fipronil application on rice paddy fields reduces densities of common skimmer and scarlet skimmer. - *Scientific Reports* 6: 1–10.

- Kumar, N., Kumar, A., Marwein, B. M., Verma, D. K., Kumar, A. and Ramamoorthy, D. 2021. Agricultural activities causing water pollution and its mitigation – a review. in press.
- Leibold, M. A. 1999. Biodiversity and nutrient enrichment in pond plankton communities. - *Evolutionary Ecology Research* 1: 73–95.
- Leibold, M. A. and Chase, J. M. 2018. Metacommunity ecology. - Princeton University Press.
- Leibold, M. A. and Miller, T. E. 2004. From Metapopulations to Metacommunities. - In: *Ecology, Genetics and Evolution of Metapopulations*. Elsevier, pp. 133–150.
- Leibold, M. A., Rudolph, F. J., Blanchet, F. G., De Meester, L., Gravel, D., Hartig, F., Peres-Neto, P., Shoemaker, L. and Chase, J. M. 2022. The internal structure of metacommunities. - *Oikos* 2022: oik.08618.
- Liess, M., Henz, S. and Knillmann, S. 2019. Predicting low-concentration effects of pesticides. - *Sci Rep* 9: 15248.
- Lim, R. P., Abdullah, M. F. and Fernando, C. H. 1984. Ecological studies of Cladocera in the ricefields of Tanjung Karang, Malaysia, subject to pesticide treatment. in press.
- Logue, J. B., Mouquet, N., Peter, H. and Hillebrand, H. 2011. Empirical approaches to metacommunities: A review and comparison with theory. - *Trends in Ecology and Evolution* 26: 482–491.

- Macedo, N., Macedo, D., Campos, M. B. S. de, Novaretti, W. R. T. and Ferraz, L. C. C. B. 2011. Manejo de Pragas e Nematoides. in press.
- Mandal, K. and Singh, B. 2014. Persistence and metabolism of fipronil in sugarcane leaves and juice. - *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 92: 220–224.
- Miller, J. L., Schmidt, T. S., van Metre, P. C., Mahler, B. J., Sandstrom, M. W., Nowell, L. H., Carlisle, D. M. and Moran, P. W. 2020. Common insecticide disrupts aquatic communities: A mesocosm-to-field ecological risk assessment of fipronil and its degradates in U.S. streams. - *Science Advances* 6: 1–13.
- Mouquet, N., Gravel, D., Massol, F. and Calcagno, V. 2013. Extending the concept of keystone species to communities and ecosystems. - *Ecology Letters* 16: 1–8.
- Oakley, J. L. and Bicknell, J. E. 2022. The impacts of tropical agriculture on biodiversity: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 59(12): 3072-3082.
- Paine, R. T. 1966. Food Web Complexity and Species Diversity. - *The American Society of Naturalists* 100: 65–75.
- Pelinson, R. M., Valente, B. R. S., Shimabukuro, E. M. and Schiesari, L. 2023. Impacts of agrochemical intensification and spatial isolation on the assembly and reassembly of temporary pond metacommunities. - *Journal of Applied Ecology*: 1365-2664.14480.
- Radzikowski, J. 2013. Resistance of dormant stages of planktonic invertebrates to adverse environmental conditions. - *Journal of Plankton Research* 35: 707–723.

- Resetarits, E. J., Cathey, S. E. and Leibold, M. A. 2018. Testing the keystone community concept: effects of landscape, patch removal, and environment on metacommunity structure. - *Ecology* 99: 57–67.
- Rohr, J. R. and Crumrine, P. W. 2005. Effects of an herbicide and an insecticide on pond community structure and processes. - *Ecological Applications* 15: 1135–1147.
- Ruhí, A., Datry, T. and Sabo, J. L. 2017. Interpreting beta-diversity components over time to conserve metacommunities in highly dynamic ecosystems. - *Conservation Biology* 31: 1459–1468.
- Schiesari, L., Saito, V., Ferreira, J., Freitas, L. S., Goebbels, A. J., Leite, J. P. C. B., Oliveira, J. C., Pelinson, R. M., Querido, B. B., Carmo, J., Espíndola, E. L. G., Guedes-Munin, N. C., Montagner, C., Rossetto, R., Taniwaki, R. and Martinelli, L. A. 2023. Community reorganization stabilizes freshwater ecosystems in intensively managed agricultural fields. - *Journal of Applied Ecology* 60: 1327–1339.
- Sharma, K., Acharya, B. K., Sharma, G., Valente, D., Pasimeni, M. R., Petrosillo, I. and Selvan, T. 2020a. Land use effect on butterfly alpha and beta diversity in the Eastern Himalaya, India. - *Ecological Indicators* in press.
- Sharma, R. S., Rana, A. and Panthari, D. 2020b. Wastewater pollution induced detrimental impacts on aquatic biodiversity: A review. - In: *Advances in Environmental Pollution Management: Wastewater Impacts and Treatment Technologies*. Agro Environ Media - Agriculture and Ennvironmental Science Academy, Haridwar, India, pp. 113–127.

- Socolar, J. B., Gilroy, J. J., Kunin, W. E. and Edwards, D. P. 2016. How Should Beta-Diversity Inform Biodiversity Conservation? - *Trends in Ecology and Evolution* 31: 67–80.
- Soranno, P.A. Carpenter, S.R. and Elser, M.M. 1993. Zooplankton community dynamics. Cambridge University Press: 116-152.
- Stampfli, N. C., Knillmann, S., Liess, M. and Beketov, M. A. 2011. Environmental context determines community sensitivity of freshwater zooplankton to a pesticide. - *Aquatic Toxicology* 104: 116–124.
- Stoyanova, Z. and Harizanova, H. 2019. Impact of agriculture on water pollution. - AGR in press.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. and Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. - *Nature* 418: 671–677.
- Urban, M. C., Leibold, M. A., Amarasekare, P., De Meester, L., Gomulkiewicz, R., Hochberg, M. E., Klausmeier, C. a, Loeuille, N., de Mazancourt, C., Norberg, J., Pantel, J. H., Strauss, S. Y., Vellend, M. and Wade, M. J. 2008. The evolutionary ecology of metacommunities. - *Trends in ecology & evolution* 23: 311–7.
- Vad, C. F., Hanny-Endrédi, A., Kratina, P., Abonyi, A., Mironova, E., Murray, D. S., Samchyshyna, L., Tsakalakis, I., Smeti, E., Spatharis, S., Tan, H., Preiler, C., Petrusek, A., Bengtsson, M. M. and Ptacnik, R. 2022. Dispersal provides trophic-level dependent insurance against a heatwave in freshwater ecosystems.- *BioRxiv*, 2022-09.

- Valente-Neto, F., da Silva, F. H., Covich, A. P. and de Oliveira Roque, F. 2020. Streams dry and ecological uniqueness rise: environmental selection drives aquatic insect patterns in a stream network prone to intermittence. - *Hydrobiologia* 847: 617–628.
- Vellend, M. 2010. Conceptual synthesis in community ecology. - *Quarterly Review of Biology* 85: 183–206.
- Wato, T. W. and Amare, M. 2020. The Agricultural Water Pollution and Its Minimization Strategies – A Review. - *JRDM* in press.
- Weatherhead, E. K. and Howden, N. J. K. 2009. The relationship between land use and surface water resources in the UK. - *Land Use Policy* 26: S243–S250.
- Yang, X., Tan, J., Sun, K. H. and Jiang, L. 2020. Experimental demonstration of the importance of keystone communities for maintaining metacommunity biodiversity and ecosystem functioning. - *Oecologia* 193: 437–447.

4. Considerações finais

Nesta tese investigamos os fatores que moldam comunidades e metacomunidades em ambientes aquáticos frente a distúrbios ambientais. Em cada capítulo exploramos aspectos distintos da reorganização de metacomunidades após a contaminação por agrotóxicos por meio de experimentos manipulativos, em mesocosmos aquáticos. No primeiro capítulo mantivemos a dispersão fixa e manipulamos a intensidade do distúrbio ao criar metacomunidades inteira e parcialmente contaminadas por fipronil. Já no segundo, manipulamos os níveis de intensidade de dispersão e mantivemos fixo a estrutura espacial da contaminação. Esperávamos observar que os distúrbios ambientais simulados com o pesticida fipronil reorganizariam as comunidades de maneira diferente dependendo da escala espacial e temporal da contaminação e da dispersão entre as comunidades locais.

No primeiro capítulo, encontramos que a contaminação por fipronil causou variação na abundância e incidência das espécies, resultando em mudanças na estrutura e diversidade das metacomunidades de zooplâncton. Os efeitos da contaminação por fipronil foram maiores nos copépodos em comparação com os cladóceros. Encontramos que a estrutura espacial da contaminação afetou a sincronia espacial entre as comunidades locais, limitando a composição das comunidades a um conjunto de espécies mais tolerantes à poluição. As metacomunidades inteiramente perturbadas apresentam respostas diferentes das metacomunidades parcialmente perturbadas por um distúrbio de poluição. Essa evidência sugere que as comunidades-chave, que não foram contaminadas pelo pesticida, foram importantes na manutenção da diversidade e composição das metacomunidades, compensando parcialmente os efeitos negativos da contaminação.

Já no segundo capítulo, encontramos que a estrutura das metacomunidades aquáticas foi influenciada pela dispersão e contaminação por pesticidas, mas sem evidências fortes de um retorno ao estado anterior ao distúrbio influenciado pela dispersão. O gradiente de contaminação e o tempo foram fatores determinantes das variações nas associações e abundâncias das espécies, alterando a estrutura da metacomunidade. A contaminação por fipronil levou a variações na abundância das espécies, enquanto a ocorrência permaneceu relativamente estável. De maneira geral, alguns táxons foram mais sensíveis aos efeitos do pesticida do que outras, como náuplios de calanoida e cyclopoda. As respostas das metacomunidades a contaminação por fipronil foram dependentes das relações entre espécies, sugerindo que as espécies que coocorrem positiva e negativamente apresentam semelhanças ecológicas entre si. Encontramos que a associação entre táxons pode indicar a existência de grupos de espécies que respondem de maneira semelhante ao distúrbio, independentemente da intensidade da dispersão ou da estrutura espacial de contaminação.

Em resumo, estes estudos proporcionaram uma compreensão de como a estrutura de metacomunidades aquáticas responde a distúrbios ambientais, especificamente à contaminação por pesticidas. Nossos principais resultados destacaram como a estrutura espacial das metacomunidades e a dispersão atuaram na dinâmica das comunidades afetadas por um pesticida, e como a contaminação afetou a abundância das espécies dentro das metacomunidades. Estudos futuros podem incorporar diferentes metodologias de experimentação em mesocosmos, permitindo uma compreensão mais abrangente das interações entre as espécies e suas respostas a distúrbios em ecossistemas aquáticos. Por exemplo, investigações futuras podem explorar melhor o entendimento do papel da dispersão afetando a dinâmica de metacomunidades aquáticas de água doce. Além disso, abordagens experimentais em mesocosmos podem contribuir para entender os

processos ecológicos que moldam as metacomunidades. Por fim, destacamos a importância da compreensão e avaliação de mudanças na estrutura das comunidades local e regionalmente, especialmente em relação às mudanças no ambiente causadas por ações antrópicas.