



Universidade Federal
de São João del-Rei

Graduação em Geografia

Bruno de Lima Gomes

**TESTANDO O SUCESSO DA RESTAURAÇÃO HIDROMORFOLÓGICA
SOBRE A MORFOMETRIA E HIDRODINÂMICA DE RIACHOS**

São João del-Rei, MG

2025

BRUNO DE LIMA GOMES

**TESTANDO O SUCESSO DA RESTAURAÇÃO HIDROMORFOLÓGICA
SOBRE A MORFOMETRIA E HIDRODINÂMICA DE RIACHOS**

Trabalho apresentado como requisito
parcial para a Conclusão do Curso de
Bacharel em Geografia da Universidade
Federal de São João del-Rei.

Orientador: Björn Gückler

São João del-Rei

2025

DEDICATÓRIA

A minha mãe, Lucimar Lima Rodrigues, que sempre acreditou na educação.

AGRADECIMENTOS

Consegui alcançar meu objetivo e, por isso, não poderia deixar de agradecer à minha irmã. Certamente, se não fosse pela confiança e pelo amor que ela sempre depositou em mim, eu não estaria concluindo esta graduação. Também faço questão de expressar minha gratidão à minha tia Lúcia por tudo o que fez e continua fazendo por mim. Aproveito para estender meus agradecimentos às minhas primas Aquilaine e Harylanne, ao meu tio Célio, à minha sobrinha Valentina e ao meu cunhado Tarcísio, que sempre estiveram ao meu lado.

Não poderia deixar de mencionar todos os membros que passaram pelo apartamento 210 da moradia estudantil. Sem dúvida, a fraternidade que se formou nesse apartamento é algo que guardarei para sempre.

Agradeço também aos professores Iola e Björn pela oportunidade de participar do Lablimno. A experiência adquirida durante esse período, assim como o carinho e a dedicação de vocês ao compartilhar seus conhecimentos, serão uma grande fonte de inspiração na minha vida profissional. Por fim, não menos importante, gostaria de agradecer a todos do laboratório pela ajuda e pela convivência harmoniosa ao longo de todo esse tempo.

EPÍGRAFE

“Caminante no hay caminho, se hace caminho al andar”

Antonio Machado, Cantares

RESUMO

Para reduzir os impactos antrópicos no meio ambiente, é imprescindível o desenvolvimento de modelos e práticas sustentáveis que visem mitigar ao máximo os efeitos de múltiplos estressores sobre os ambientes naturais. Nas últimas décadas, diversos estudos têm se concentrado na criação de métodos para a restauração de ambientes lóticos que sofreram algum tipo de estressor ao longo de seu curso. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o sucesso da restauração hidromorfológica em relação à morfometria e à hidrodinâmica de riachos. Para isso, partiu-se da hipótese de que os riachos restaurados apresentariam padrões de diversidade hidrodinâmica similares aos de ambientes naturais. Além disso, riachos restaurados teriam padrões morfológicos distintos dos ambientes impactados, e riachos impactados possuiriam uma hidromorfologia simplificada, com menos zonas de remanso e maior velocidade de fluxo.

Foram realizados trabalhos de campo para coletar dados morfométricos e hidrodinâmicos dos riachos analisados. Como resultado, observou-se o êxito da restauração em aspectos como largura, velocidade e no desenvolvimento de zonas de armazenamento. Isso pode ser explicado pelo fato de o controle negativo possuir um canal retilíneo, que aumenta a velocidade do fluxo, em contraste com o ambiente natural e o restaurado, onde há vegetação ripária bem estabelecida. Por outro lado, o riacho impactado apresentou uma diversidade levemente superior à observada no restaurado, indicando que o restabelecimento da vegetação ripária, sem alterações significativas em sua morfometria, não foi suficiente para aumentar a diversidade a ponto de se aproximar da observada no controle positivo.

No geral, a restauração mostrou-se efetiva, pois o riacho restaurado se aproximou mais do ambiente natural, em detrimento do impactado. O pioneirismo deste trabalho na microrregião de São João del-Rei é fundamental para discutir o estado de conservação dos ecossistemas de águas correntes, não apenas para o município, mas também para o país. Nesse sentido, ele busca compreender a situação atual e propor melhorias, além de aprimorar as práticas de restauração e o restabelecimento dos ambientes de água doce.

Palavras-chave: Hidromorfologia; Restauração; Diversidade

ABSTRACT

To reduce anthropogenic impacts on the environment, it is essential to develop sustainable models and practices aimed at minimizing the effects of multiple stressors on natural environments. In recent decades, several studies have focused on creating methods for restoring lotic environments that have suffered some type of stressor along their course. The present study aimed to evaluate the success of hydromorphological restoration in relation to the morphometry and hydrodynamics of streams. It was hypothesized that restored streams would exhibit hydrodynamic diversity patterns similar to those of natural environments. Additionally, restored streams would have morphological patterns distinct from impacted environments, and impacted streams would possess simplified hydromorphology, with fewer pool areas and higher flow velocity.

Fieldwork was conducted to collect morphometric and hydrodynamic data from the streams analyzed. As a result, the success of the restoration was observed in aspects such as width, velocity, and the development of absolute storage zones in the streams. This can be explained by the fact that the negative control has a straightened channel, which increases flow velocity, in contrast to the natural and restored environments, which feature well-established riparian vegetation. On the other hand, the impacted stream showed slightly higher diversity than the restored stream, demonstrating that the reestablishment of riparian vegetation, without significant alteration of its morphometry, alone was not enough to increase diversity to a level close to that observed in the positive control. Overall, the restoration was effective, as the restored stream more closely resembled the natural environment, in contrast to the impacted one.

The pioneering nature of this work for the São João del-Rei microregion is crucial for discussing the state of conservation of lotic ecosystems, not only for the municipality but also for the country. In this sense, it aims to understand the current situation and propose improvements, as well as enhance restoration practices and the restoration of freshwater environments.

Keywords: Hydromorphology; Restoration; Diversity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e localização dos riachos..... 13

Tabela 2 - Características hidromorfológicas dos trechos de riachos.....21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa com as localizações dos riachos	15
Figura 2 - Curvas de passagem da pluma do marcador.....	18
Figura 3 – Imagem ilustrativa do armazenamento temporário de água.....	22
Figura 4 – Contribuições relativas das diversidades hidromorfológicas α e β para a diversidade γ da largura do canal.....	23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS E HIPOTHESES.....	13
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	13
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
5. MATERIAIS E METODOS.....	18
5.1. Coleta de dados in situ.....	18
5.2. Modelagem de dados hidromorfológicos e hidrodinâmicos.....	21
5.3. Análises estatísticas.....	21
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
7. CONCLUSÃO.....	25
8. BIBLIOGRAFIA.....	27

1. INTRODUÇÃO

É indispensável considerar os serviços ecossistêmicos, reconhecendo a importância dos riachos para o meio ambiente. A relevância desses ambientes lóticos, especialmente nas regiões tropicais, vai além de sua contribuição para a manutenção da vazão das bacias hidrográficas, abrangendo também seu alto índice de biodiversidade e endemismo (Collen et al., 2014). Ao longo da história, o uso e a ocupação do solo têm priorizado as margens de rios e riachos (Vandenberghe, 2015). Como consequência dessas ocupações, muitos riachos sofreram severas modificações em sua hidromorfologia.

São evidentes as várias consequências decorrentes das intervenções antrópicas nesses ecossistemas, destacando-se o assoreamento dos canais após a supressão da vegetação ripária, a canalização dos cursos d'água e, conseqüentemente, o aumento do material particulado em suspensão (Gücker et al., 2009). Além disso, a remoção da vegetação nativa nas margens dos rios aumenta a incidência de luz solar sobre a lâmina d'água, o que eleva a temperatura e altera as taxas de produção primária e decomposição de matéria orgânica (Young & Huryn, 1999).

Dada a magnitude da degradação dos ecossistemas aquáticos, foi cunhado o termo “efeito legado” para descrever a pressão antropogênica que herdamos e que estamos repassando às futuras gerações (Wohl, 2019). Com quase 2% das espécies do planeta, as águas continentais são responsáveis por cerca de 10% do endemismo global, o que torna imprescindível sua preservação para a manutenção de processos ecossistêmicos essenciais, como a produção primária, a respiração do ecossistema e a ciclagem de nutrientes (Reid et al., 2019; Silva-Júnior et al., 2014).

Devido às vulnerabilidades ecológicas a que rios e riachos estão expostos, ocasionadas por diversas pressões antropogênicas que afetam os processos químicos, físicos e biológicos dos corpos d'água, destaca-se a influência da irrigação na agricultura intensiva e o descarte inadequado de esgoto. Essas pressões resultam, em grande parte, na redução drástica da vazão desses cursos, o que, por sua vez, aumenta significativamente a disponibilidade de recursos para os organismos aquáticos (Chen et al., 2003; Gücker et al., 2009). Nesse contexto, é importante ressaltar que a remoção da vegetação ripária ao longo dos rios é um fator determinante, pois intensifica a incidência

de luz solar, elevando as taxas de produção primária e de decomposição (Young & Huryn, 1999). Diante da grande pressão antrópica sobre os ambientes de água doce e da escassa percepção sobre a degradação e perda da biodiversidade lótica, alguns pesquisadores consideram isso uma “crise silenciosa”, evidenciada pelos casos de extinção registrados ao redor do mundo (Richter et al., 1997).

Inserida na região do Campo das Vertentes, em uma área de transição entre os biomas cerrado e mata atlântica, a microrregião de São João del-Rei sempre se caracterizou por uma economia diversificada (Baruqui et al., 2016; Gomes, 2012). Dentre suas principais atividades, destacam-se a mineração e a agricultura, que, de certa forma, influenciaram as multifuncionalidades ecossistêmicas da região, especialmente no que se refere aos serviços relacionados às águas correntes.

Nas últimas décadas, o uso e a ocupação do solo no município passaram por significativas transformações, com destaque para o mosaico de uso da terra. Observou-se um declínio na área destinada a pastagens, com aumento na cobertura de vegetação arbórea e arbustiva. Esse processo tem favorecido a recuperação de alguns riachos, que exibem sinais de restauração da vegetação ripária, embora sem uma intenção explícita de restauração lótica. Nesse contexto, São João del-Rei se mostra um ambiente propício para a aplicação de técnicas de restauração hidromorfológica, especialmente no que diz respeito à morfometria e à hidrodinâmica dos riachos.

Diante dessa situação, foram realizados trabalhos de campo para mapear os riachos analisados neste estudo. Optou-se por classificá-los em três categorias: controle positivo, controle negativo e restaurado. O controle positivo foi definido como aquele que apresenta características de um ambiente pouco ou nada impactado por pressões antropogênicas ao longo de seu curso. O riacho controle negativo foi aquele que sofreu, ou ainda sofre, fortes pressões antrópicas. Por fim, o riacho restaurado passou por algum tipo de processo de restauração ao longo de seu curso.

Nas últimas décadas, vários projetos vêm sendo implementados para restaurar rios e riachos, buscando o restabelecimento de serviços ecossistêmicos. Para tanto, modificam-se, por exemplo, a estrutura física e a morfologia desses ambientes — antes alterados para fins agrícolas ou urbanos —, visando aumentar a diversidade e criar zonas de remanso. Além disso, o reflorestamento das áreas de entorno é imprescindível para a recuperação

da vegetação ripária. Nesse contexto, pesquisas propositivas têm sido desenvolvidas para criar técnicas e estratégias que melhorem a resposta desses ecossistemas aos processos de restauração.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESES

Este trabalho de conclusão de curso insere-se no crescente reconhecimento social dos problemas ambientais que enfrentamos. Integrando a abordagem morfométrica do projeto RESTOLINK, objetiva-se compreender os impactos da restauração hidromorfológica na morfometria e na hidrodinâmica de riachos localizados na microrregião de São João del-Rei (MG). De modo geral, a proposta busca testar o sucesso da restauração fluvial na recuperação da diversidade hidromorfológica e hidrodinâmica desses ambientes.

Especificamente, formulamos as seguintes hipóteses:

H1: Riachos restaurados devem apresentar diversidade hidrodinâmica (fluxo, velocidade) semelhante à de riachos naturais e maior do que a de riachos impactados.

H2: Riachos restaurados devem exibir diversidade hidromorfológica (largura e profundidade do canal) semelhante à de riachos naturais e maior do que a de riachos impactados.

H3: Devido à modificação física para diferentes usos, o riacho controle negativo apresentará ao longo do canal menos zonas de remanso e maior velocidade de fluxo.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Os riachos selecionados foram:

- a) Riacho PACU** (Tabela 1, Fig. 1), classificado como controle negativo. Localiza-se no município de Tiradentes e apresenta canal retilíneo, erosão em margens e leito e supressão de vegetação nativa, pois a área é utilizada para pastagem de animais.
- b) Riacho CUIABÁS** (Tabela 1, Fig. 1), classificado como restaurado. Também situado em Tiradentes, percorre uma antiga área de pastagem que teve sua vegetação ripária removida. Com a implementação de um condomínio residencial

há cerca de vinte anos, o riacho foi inserido em área de preservação ambiental, possuindo atualmente mata ciliar em processo de recuperação.

- c) **Riacho CORREIAS** (Tabela 1, Fig. 1), classificado como controle positivo. Localiza-se próximo ao município de Resende Costa, em reserva legal de fazenda, com vegetação ripária densa, variação de largura, presença de meandros e elevada diversidade biológica.

Tabela 1. Características e localização dos riachos investigados no presente IC.

Riacho	Localização geográfica	Caracterização	Imagem do local
Cuiabás “restaurado”	21° 06' 22.62"S 44°09'46.91"W	Riacho que anteriormente atravessava uma área de pastagem e possuía escassa vegetação ripária. Atualmente, está situado em uma área de preservação ambiental de um condomínio residencial, com a mata ciliar em processo de recuperação há aproximadamente 20 anos. No entanto, há uma "trilha ecológica" no entorno imediato do riacho. O substrato é predominantemente formado por areia fina e raízes da vegetação ripária, sendo coberto por folhas e detritos	

Correias "controle positivo"	20° 59' 19.55"S 44°10'44.80"W	Vegetação preservada com mata ciliar densa, curso d'água meândrico com significativa variação de largura, substrato natural e diversificado, incluindo areia, silte, argila, detritos finos, raízes, folhas (cobertura dominante) e galhos. Situado na reserva legal de uma fazenda.	
Pacu "controle negativo"	21° 06' 30.34"S 44°10'47.13"W	Riacho em área de pastagem, sem vegetação ripária. Curso d'água canalizado, apresentando sequências de erosão nas margens e no leito. Substrato predominantemente mineral, composto por areia, silte e argila, com acúmulo de detritos e crescimento de gramíneas em algumas áreas.	

Todos os riachos se localizam em uma zona de transição entre mata atlântica e cerrado, conhecida por sua alta biodiversidade. Segundo Köppen-Geiger, a região tem clima tropical de altitude, com períodos quentes e úmidos (outubro a março) e frios e secos (abril a setembro), e precipitação anual de ~1400 mm (Gücker et al., 2024). O relevo é suave, variando entre 800 e 900 m de altitude (Francesconi, 1972), e os solos são heterogêneos, com presença de latossolos, cambissolos, neossolos litólicos e argissolos (Gücker et al., 2024).

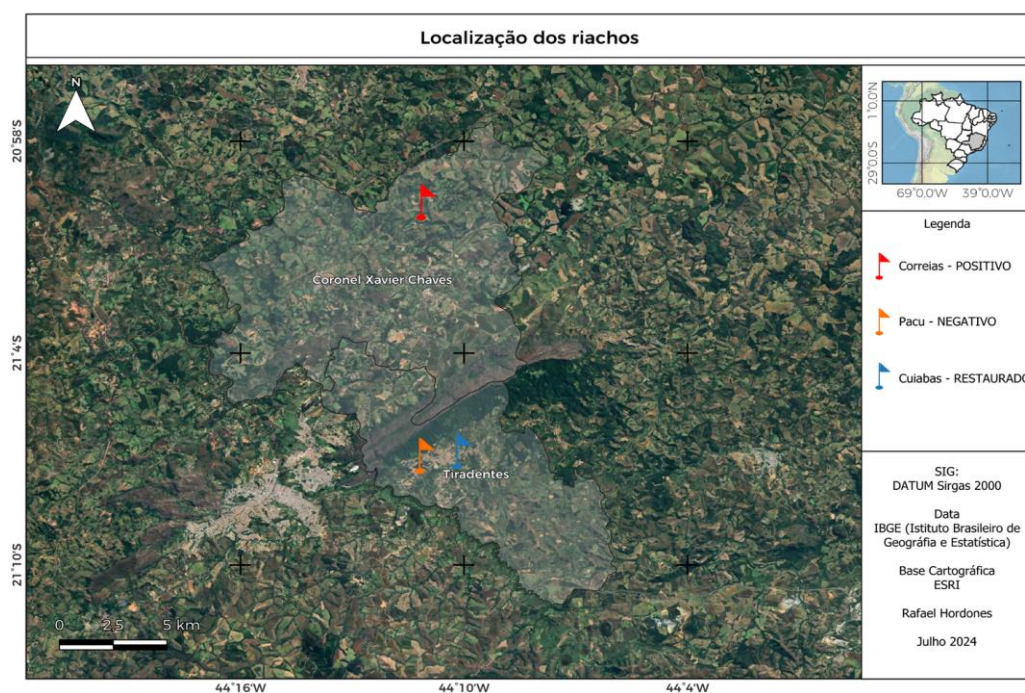


Fig 1. Mapa com as localizações dos riachos. Elaborado por: Rafael Hordones.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ano após ano, cresce o debate sobre a proteção ambiental e o desenvolvimento sustentável. Embora ainda incipiente, esse panorama fomenta pesquisas que visam restaurar serviços ecossistêmicos na maior proximidade possível de suas condições originais. Nesse sentido, destaca-se a pressão de múltiplos estressores sobre as águas correntes, não apenas pela extensão dos impactos, mas também pela falta de percepção pública acerca da importância desses ambientes ricos em endemismos (Clarke et al., 2003).

Para enfrentar esse desafio, promovem-se modificações em canais degradados para aumentar a heterogeneidade estrutural, incluindo a recomposição da vegetação ripária e intervenções na morfologia (p. ex., criação de meandros, zonas de remanso) (Palmer et al., 2010). Embora a ciência da restauração hidrológica tenha avançado consideravelmente, ainda existem lacunas significativas no entendimento dos efeitos de restaurações fluviais. Isso envolve questões conceituais, conectividade físico-química e biológica, além de aspectos relacionados à escala temporal e espacial, bem como a necessidade de monitoramento contínuo para avaliar o sucesso ou fracasso das ações de restauração (Clarke et al., 2003).

Ao se comparar a restauração ecológica fluvial àquela voltada apenas para fins recreativos ou estéticos, observa-se que a restauração ecológica fluvial tem como principal objetivo o restabelecimento de condições ideais para que o ecossistema natural se desenvolva na bacia hidrográfica, procurando restaurar características outrora perdidas (Wohl et al., 2015). Por outro lado, a restauração com fins recreativos destina-se a atender apenas necessidades estéticas de um determinado lugar, relegando a segundo plano o aspecto que seria mais importante nesse contexto: o restabelecimento da biota.

Dado o seu caráter multidisciplinar, o desenvolvimento de trabalhos voltados ao restabelecimento dos serviços ecossistêmicos enfrenta diversos desafios, especialmente no que se refere à medição e à representação da diversidade hidromorfológica e dos habitats. Isso ocorre porque a maioria das restaurações é realizada em escala limitada, fazendo com que muitos projetos publicados permaneçam restritos a pequenas áreas (Verdonschot et al., 2016). Embora tanto a Europa quanto os Estados Unidos contem com décadas de expertise e pioneirismo na reestruturação de pequenos riachos, ainda há vários obstáculos para restaurar os serviços ecossistêmicos aquáticos. Esses desafios vão desde questões de financiamento — considerando a complexidade espacial e financeira de restaurar todos os riachos — até problemas de jurisdição, pois muitos desses cursos d'água atravessam pequenas propriedades privadas (Palmer et al., 2014).

Para empreender a restauração de serviços ecossistêmicos, é fundamental adotar um enfoque abrangente, que vá além de uma abordagem fragmentada de bacia. Nesse sentido, recomenda-se priorizar a restauração de toda a bacia em sua totalidade. Restaurar apenas um pequeno trecho de um canal, sem considerar suas interligações — como o transporte de sedimentos e material orgânico de montante para jusante, as migrações da ictiofauna e os fatores químicos da água — compromete o sucesso da iniciativa (Palmer et al., 2005; Smith et al., 2014).

Alguns pesquisadores vêm desenvolvendo modelos de avaliação com o objetivo de unificar critérios, pois a ausência de padrões estabelecidos é um dos fatores que dificultam o financiamento e, conseqüentemente, o monitoramento eficaz de projetos de restauração (Wohl et al., 2005; Palmer et al., 2005). Esses modelos de avaliação incluem desde pesquisas para obter informações históricas sobre o rio, que irão nortear o processo de restauração, até a identificação de locais que não sofreram perturbações e que podem

servir de referência (Palmer et al., 2005). Além disso, aborda-se uma análise mais detalhada do funcionamento dos serviços ecossistêmicos da bacia a ser restaurada, contemplando aspectos como morfometria, características sedimentológicas, vazão e outros fatores (Wohl et al., 2015; Palmer et al., 2005).

Inicialmente, é fundamental caracterizar a hidromorfologia, que se refere à interação entre os aspectos hidrológicos e as características físicas da morfologia dos corpos d'água (Belletti et al., 2015). Dada a complexidade e a diversidade estrutural dos ambientes lóticos, que apresentam uma variedade de formatos — como meandros, declividade, índices pluviométricos e temperaturas diferentes — além das intervenções antropogênicas, que variam de acordo com cada caso, torna-se impossível unificar uma metodologia abrangente aplicável a todos os riachos (Palmer et al., 2010). Em muitos casos, devido à antiguidade da civilização e ao grau de industrialização de determinados cursos hídricos, não existem pontos de referência, o que dificulta a determinação precisa das características originais desses ambientes (Woolsey et al., 2007).

5. MATERIAIS E METODOS

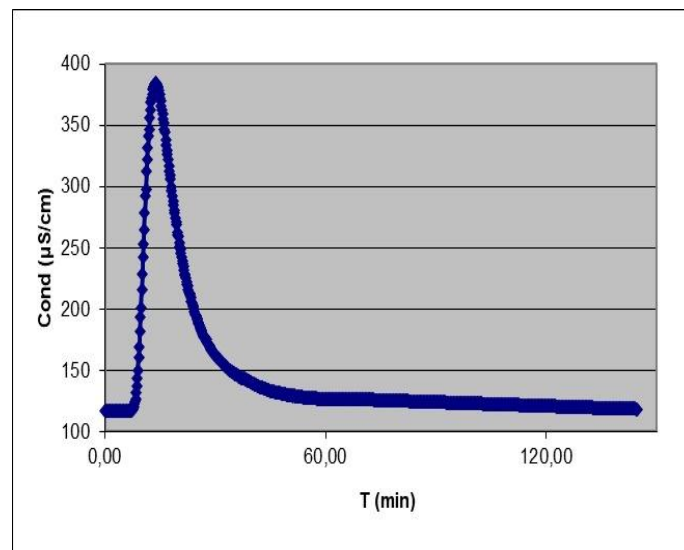
Inicialmente, para a elaboração do projeto RESTOLINK, foi desenvolvido um protocolo de amostragem que descrevia detalhadamente o passo a passo das coletas. O processo teve início com a seleção dos sistemas a serem estudados, classificados em três categorias: natural (controle positivo), impactado (controle negativo) e restaurado. Foram escolhidos três riachos, todos com ordem Strahler inferior a 3 e com profundidade do leito mínima de 10 cm. Outros critérios utilizados para a seleção dos riachos incluíram a vazão, que deveria ser inferior a 300 L/s, e a concentração de nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$), que precisava ser inferior a 2 mg/L.

5.1 COLETA DE DADOS HIDRODINÂMICOS IN SITU

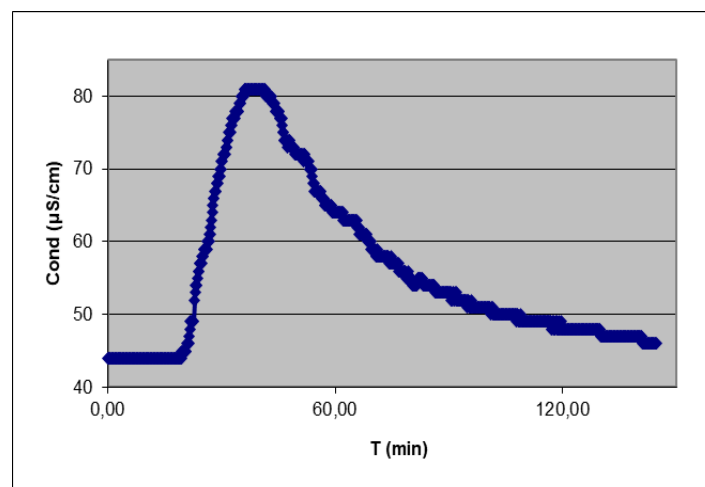
Nos riachos foram delimitados, com auxílio de trena, os trechos de estudo, compreendendo entre 25 e 120 metros, dependendo dos tempos de residência de água dos riachos. Posteriormente, dentro de cada trecho, foram plotados os pontos onde ficariam cada um dos “patches” de medições de turbulência. No início de cada trecho foi adicionada uma solução de NaCl, como marcador hidrológico. Uma sonda

multiparâmetro (YSI, EUA), equipada com sensor de condutância elétrica, foi alocada no final de cada trecho para registrar as curvas de passagem da pluma de NaCl (Fig. 2). Esse procedimento, que parte da premissa de liberação de um tracer conservativo (NaCl), permitiu determinar a vazão, a velocidade, a dispersão e a contribuição das zonas de remanso (Hauer & Lamberti, 2017) ao longo de cada trecho. Este procedimento de medição de características hidrodinâmicas de ambientes lóticos é essencial, pois ela desempenha um papel crucial na distribuição de sedimentos suspensos, de matéria orgânica particulada e na dispersão da biota ribeirinha (Fernández et al. 2011).

Pacu



Cuiabás



Correias

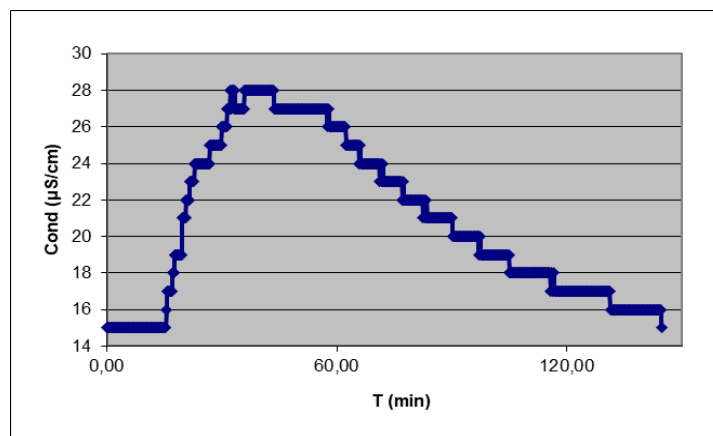


Figura 2. Curvas de passagem da pluma do marcador hidrológico (NaCl).

Em seguida, foi utilizada uma trena e um metro articulado para caracterizar os habitats hidromorfológicos. Um transecto transversal foi traçado nos riachos utilizando a trena, enquanto o metro articulado serviu para mensurar a profundidade do canal, ao longo do transecto. Nos riachos menores, como o PACU e o CUIABÁS, optou-se por realizar medições a cada 2 cm. Já no riacho CORREIAS, que apresenta uma variação considerável de largura, foram realizadas medições a cada 5 cm. Vale ressaltar que foram realizadas três mensurações por “patch” experimental do projeto RESTOLINK, totalizando 15 transectos por riacho.

Para realizar medições de fluxos e turbulência foi utilizado um velocímetro de doppler acústico (ADV; Nortek Vectrino), equipado com medidores a laser e com frequência estabelecida superior a 25 hz. Cada medição demorou cerca de 10 minutos em cada um de 4 pontos estabelecidos por patch. O protocolo de medidas realizado com auxílio deste equipamento nos riachos foi desenvolvido por pesquisadores e parceiros alemães do projeto, sendo a premissa básica do medidor a laser a formação de triangulações, que traçam e mapeiam as coordenadas cartesianas de pontos nos leitos de rios, fornecendo um diagnóstico das características do leito de pequenos riachos (Noss et al., 2018).

5.2 MODELAGEM DE DADOS HIDROMORFOLÓGICOS E HIDRODINÂMICOS

Buscou-se utilizar neste trabalho, método empírico simples empregado por Hard (1995) e com os dados de condutividade elétrica e das características morfológicas dos

riachos de controle positivo, controle negativo e restaurado, foram calculados os valores de vazão (em L/s), velocidade média (em m/s), dispersão longitudinal (em m²/s) e a contribuição das zonas de remanso. No que tange ao cálculo da diversidade hidrodinâmica, é fundamental compreender seus níveis de variância e nuances. Para isso, é necessário contextualizar as diversidades alfa (α), beta (β) e gama (γ). A diversidade alfa refere-se à diversidade presente dentro de um único ponto, enquanto a diversidade beta busca entender as variações entre diferentes pontos dentro do riacho em estudo. Por fim, a diversidade gama abrange a diversidade total do riacho, sendo obtida pela soma das diversidades alfa e beta (Whittaker, 1972)

5.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para as análises estatísticas, as medidas obtidas de variáveis hidromorfológicas e hidrodinâmicas no campo foram comparadas entre os sistemas natural, impactado e restaurado por meio de *one-way ANOVA* (Sthle & Wold, 1989), seguido por teste de *Tukey-HSD*. A distribuição de todos os dados foi previamente testada para normalidade e homogeneidade de variâncias. Para dados não paramétricos, foi adotado um procedimento estatístico não paramétrico (Kruskal et al., 2014). Todas as análises estatísticas foram realizadas empregando o programa R (R Core, 2013).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificamos que a vazão mínima registrada foi de 0,67 L s⁻¹ (riacho Cuiabás) e a máxima foi de 1,71 L s⁻¹ (riacho Pacu), com o riacho natural (riacho Correias) apresentando uma vazão intermediária, de 1,68 L s⁻¹ (Tabela 2). É importante destacar que, de modo geral, os riachos mostraram vazões baixas, o que é condizente com riachos de pequena ordem e o fato de que a coleta ocorreu durante a estação seca. Quanto à largura, o riacho Correias apresentou características compatíveis com seu ambiente natural, que não sofre grandes estressores em seu curso. Como era esperado, o riacho considerado controle negativo foi aquele que apresentou a menor largura, com medidas de 0,23 +/- 0,07 m (média +/- dp). Essa redução se deve ao ambiente de pastagem no qual o riacho está inserido, que resultou em modificações na morfologia do canal, visando sua retificação.

Característica	Cuiabás (R)	Correias (CP)	Pacu (CN)
Declividade (m/m)	0,013	0,018	0,008
Altitude (m a.s.l.)	925	983	903
Comprimento (m)	25	40	120
Vazão (L/s)	0,67	1,68	1,71
Velocidade de fluxo do trecho (m/s)	0,011	0,07	0,026
Largura do canal (m)	0,64±0,13 ^A	0,91±0,68 ^A	0,23±0,07 ^B
<h> (cm)	11,2±1,4 ^A	14,6±6,5 ^{AB}	16,4±5,9 ^B
Velocidade perto do leito do fundo (cm s ⁻¹)	0,38±0,19	0,79 ± 1,57	4,69 ± 3,91
Energia cinética turbulenta (cm ² s ⁻²)	0,23×10 ⁻³ ± 0,27×10 ⁻³	7,06×10 ⁻³ ± 22,06×10 ⁻³	27,23×10 ⁻³ ± 43,53×10 ⁻³
Dispersão longitudinal (m/s ²)	0,00329	0,0058	0,03148
K1 (s ⁻¹)	0,00031	0,00029	0,00103
K2 (s ⁻¹)	0,00042	0,00047	0,00207
As/A	0,732	0,621	0,495

Tabela 2. Características hidromorfológicas dos trechos de riachos investigados: declividade, altitude (cota), extensão do trecho, L; vazão, Q; velocidade de fluxo do trecho, v; largura do canal, w; profundidade do canal, <h>; velocidade perto do leito de fundo <ū>; energia cinética turbulenta, TKE; razão entre a área transversal das zonas de remanso e a área do canal advectivo, As/A. Tipologia dos riachos: Restaurado (R), controle positivo (CP) e controle negativo (CN). Letras maiúsculas mostram diferenças significativas entre riachos (P<0.05, ANOVA e teste Kruskal, e testes pós-hoc).

Ao analisar as curvas de passagem da pluma de NaCl, produzidas com os dados de condutividade (Fig. 2; Tab. 2), constatou-se uma hidrodinâmica distinta do riacho impactado, com maiores velocidades do fluxo totais e perto do leito, maior dispersão, e menor importância de zonas de remanso (As/A), em comparação aos demais riachos, coerente com sua morfologia retilínea.

Ao analisar os dados das zonas de remanso, é importante definir os parâmetros K1 e K2. K1 refere-se à troca de água da zona advectiva para a zona de armazenamento

temporário, enquanto o K2 representa o fluxo de água das zonas de remanso de volta para a zona advectiva (Fig. 2). As zonas de armazenamento temporário são áreas do canal onde a água se desloca de forma mais lenta (Hall et al., 2002). Com o propósito de examinarmos os dados referentes ao armazenamento temporário, observamos que o riacho impactado (controle negativo) apresentou uma razão entre a área transversal da zona de armazenamento temporário e a zona advectiva (A_s/A) estimada em aproximadamente 0,5. Esse resultado sugere que o transporte de água pelo canal é superior ao armazenamento nas zonas de remanso.

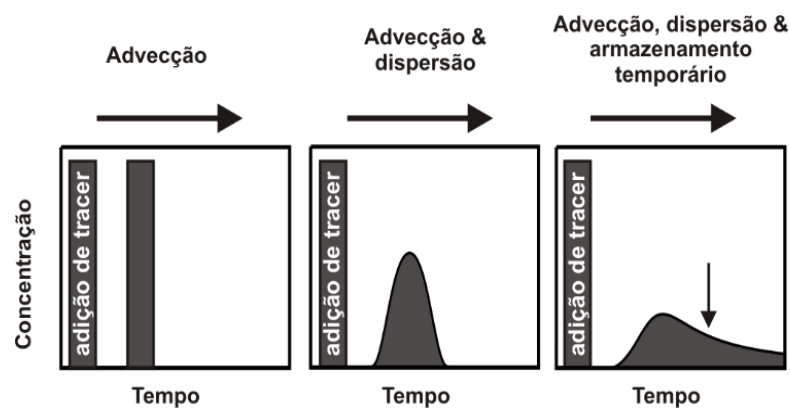


Fig 3. Imagem ilustrativa do armazenamento temporário de água. Adaptado por: Bjorn Gucker.

Por outro lado, o riacho restaurado apresentou uma maior presença de água nas zonas temporárias, com um valor de 0,7, comparado com os outros riachos, superando até mesmo o riacho natural (controle positivo), que apresentou um valor de 0,6. Esse fenômeno pode ser explicado pela presença de zonas de remanso ao longo do percurso do riacho restaurado, além de suas sinuosidades. Estudos sobre riachos restaurados indicam que a formação de uma estrutura detrítica, composta por deposição de material orgânico, pode facilitar a criação de zonas de remanso, aumentando assim, o armazenamento temporário ao longo do curso do riacho (Bukaveckas, 2007).

A largura e a profundidade mostraram diferenças significativas entre os riachos (Tabela 2), indicando que a restauração foi parcialmente bem-sucedida, uma vez que o riacho restaurado mostrou valores significativamente diferentes aos do riacho controle negativo. As velocidades perto do leito e a energia turbulenta não mostraram diferenças entre riachos e as demais variáveis representam medições não replicadas, que não puderam ser submetidas a testes estatísticos.

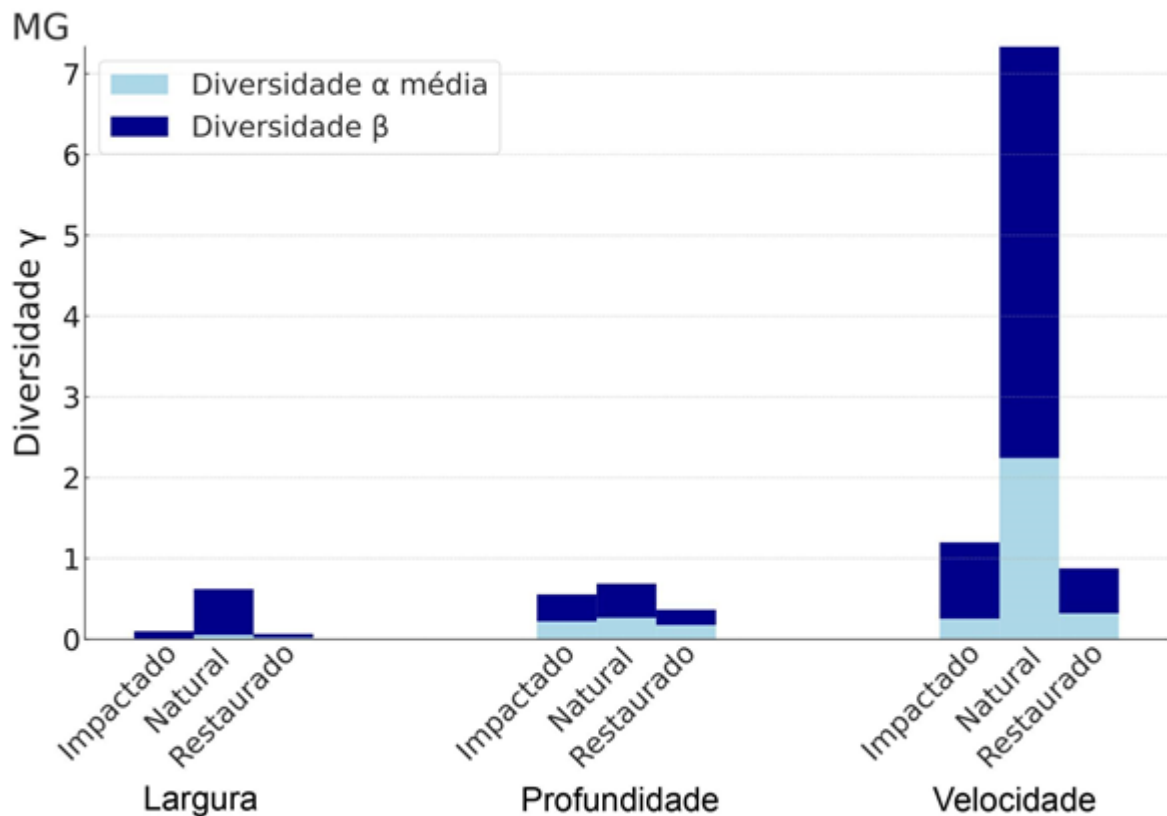


Figura 4. Contribuições relativas das diversidades hidromorfológicas α e β para a diversidade γ da largura do canal, da profundidade e do fluxo nos riachos Correias (natural), Cuiabás (restaurado) e Pacu (impactado).

Nesse contexto, constatou-se que o riacho natural (controle positivo) indicou uma maior diversidade γ na largura e profundidade do canal, bem como na velocidade do fluxo. O restaurado apresentou valores abaixo dos registrados para os riachos natural e impactado. Portanto, a análise da diversidade hidromorfológica e hidrodinâmica mostrou que a restauração por reflorestamento, sozinha, não foi capaz de restaurar a variabilidade natural do riacho Cuiabás. Vale destacar que, pelo fato do riacho impactado (controle negativo) possuir alguns pontos com erosões em sua margem e leito, observou-se o efeito contrário ao esperado, com o riacho impactado possuindo um pouco mais de variabilidade do que o riacho restaurado.

Tendo sido utilizado para pastagem no passado, o reflorestamento advindo da transformação do local em área de preservação não surtiu efeito em diversificar o canal do riacho Cuiabás em sua largura e profundidade. Jähnig et al. (2011) avaliando restaurações, parte do pressuposto que o êxito ou seu fracasso dependem da ótica do avaliador, podendo partir tanto de um ponto de vista objetivo (mensurável), quanto de um

ponto de vista mais subjetivo, como por exemplo, o valor estético. No caso do riacho Cuiabás, por exigência legal para se compensar a implementação do condomínio, a criação da área de reserva teve como escopo apenas a restauração da vegetação, relegando-se o riacho a segundo plano. Por outro lado, a restauração foi efetiva ao considerarmos as semelhanças observadas entre o riacho restaurado e o riacho natural, do ponto de vista da largura, profundidade, velocidades e zonas de remanso absolutas.

No que se refere à terceira hipótese testada neste projeto, confirmamos o seu êxito no que tange o fato do riacho impactado (controle negativo) ter apresentado menos zonas de remanso em seu curso, quando comparado aos riachos restaurado e natural. Sua velocidade também foi substancialmente maior do que a velocidade medida nos demais riachos.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral testar a eficácia da restauração hidromorfológica na morfometria e na hidrodinâmica de riachos. Hipotetizamos que riachos restaurados apresentariam padrões de diversidade hidrodinâmica (H1) e morfológica (H2) superiores aos de riachos impactados e semelhantes aos de riachos naturais. Além disso, nosso objetivo era verificar se o riacho considerado controle negativo apresentava, ao longo de seu curso, menos zonas de remanso e uma velocidade de fluxo maior (H3).

Embora o riacho restaurado tenha demonstrado uma diversidade menor do que o riacho impactado, isso se deve, em grande parte, ao contexto da restauração, que enfatizou mais o reflorestamento do que a recuperação do curso hídrico. Em contraste, as erosões de margem e do leito, observadas no controle negativo, resultaram em maior diversidade hidromorfológica. No entanto, a restauração do riacho pode ser considerada efetiva, pois resultou em padrões de largura, profundidade, velocidade e zonas de remanso semelhantes ou superiores aos medidos no riacho natural estudado. Por fim, a terceira hipótese também foi confirmada, evidenciando-se que o riacho impactado apresentava uma hidromorfologia simplificada, com poucas zonas de armazenamento e com velocidade de fluxo superior aos demais sistemas estudados.

Os estudos sobre a restauração de riachos tornam-se cada vez mais essenciais à medida que o debate público sobre as intervenções antrópicas no meio ambiente ganha

força na sociedade. No entanto, ainda caminhamos a passos lentos na busca pela elaboração de um protocolo que unifique uma técnica capaz de servir como ponto de referência para a restauração hidromorfológica, respeitando as características específicas de cada região. Por outro lado, diversos trabalhos têm destacado a necessidade de acelerar os projetos de restauração, considerando que muitos ecossistemas de águas correntes estão se aproximando de um ponto de não retorno, seja pela dificuldade de restabelecer as condições físicas previamente perdidas, seja pelo crescente índice de extinções que os ambientes lóticos enfrentam atualmente.

No Brasil, as pesquisas sobre restauração hídrica ainda são escassas, o que pode ser explicado pela limitação de projetos focados exclusivamente na recuperação da diversidade de rios e riachos. Ainda persiste, no imaginário popular, a ideia de que modificações em riachos, quando voltadas apenas para atender demandas estéticas, são benéficas para o meio ambiente — o que, na realidade, não se confirma. Nesse contexto, este trabalho se torna fundamental para discutir a necessidade de iniciar processos de restauração hídrica no país, especialmente na microrregião de São João del-Rei. Apesar de se observar um crescimento da vegetação na região em comparação com o passado recente, é difícil encontrar riachos que estejam passando por processos de restauração que contemplem a reconstituição de suas características originais, incluindo intervenções em sua morfometria, hidrodinâmica, entre outros aspectos.

BIBLIOGRAFIA:

- BARNOSKY, Anthony D. et al. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, v. 471, n. 7336, p. 51-57, 2011.
- BELLETTI, Barbara et al. A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environmental Earth Sciences*, v. 73, p. 2079-2100, 2015
- BUKAVECKAS, P.A. (2007). Effects of channel restoration on water velocity, transient storage, and nutrient uptake in a channelized stream. *Environmental Science and Technology*, 41(5), 1570-1576.
- CHEN, Jingsheng; HE, Dawei; CUI, Shubin. The response of river water quality and quantity to the development of irrigated agriculture in the last 4 decades in the Yellow River Basin, China. *Water Resources Research*, v. 39, n. 3, 2003.
- CLARKE, S.J.; BRUCE-BURGESS, L.; & WHARTON, G. (2003). Linking form and function: towards an eco-hydromorphic approach to sustainable river restoration. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 13(5), 439-450.
- COLLEN, B. et al. (2014). Global patterns of freshwater species diversity, threat and endemism. *Global Ecology and Biogeography*, 23(1), 40-51.
- FERNÁNDEZ, D.; BARQUIN, J.; & RAVEN, P. (2011). A review of river habitat characterization methods: indices vs. characterization protocols. *Limnetica*, 30 (2), 217-234.
- FRANCESCONI, R. (1972). Pegmatitos da região de São João del Rei, MG. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- GÜCKER, B.; BOËCHAT, I. G.; & GIANI, A. (2009). Impacts of agricultural land use on ecosystem structure and whole-stream metabolism of tropical Cerrado streams. *Freshwater Biology*, 54, 2069–2085.
- GÜCKER, B.; BRAUNS, M.; SANTOS, A. T.; DE CARVALHO, A. P.; & BOËCHAT, I. G. (2024). Contrasting effects of agriculture and urban land use on macroinvertebrate secondary production in Neotropical streams. *Ecological Indicators*, 162, 112039.
- HALL, R. J. O.; BERNHARDT, E. S.; & LIKENS, G. E. (2002). Relating nutrient uptake with transient storage in forested mountain streams. *Limnology and*

Oceanography, 47(1), 255-265.

JAHNIG, S. C.; LORENZ, A. W.; HERING, D.; ANTONS, C.; SUNDERMANN, A.; JEDICKE, E.; & HAASE, P. (2011). River restoration success: a question of perception. *Ecological Applications*, 21(6), 2007-2015.

KRUSKAL, W. H., Wallis, W. A., Kruskal, W. H., Wallis, W. A., Mann, H. B., Whitney, D. R., Sthle, L., Wold, S., Hsu, H., & Lachenbruch, P. A. (2014). *Journal of the American Statistical Analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 47(1), 259–272. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80095-](https://doi.org/10.1016/0169-7439(89)80095-4)

NOSS, C., WILKINSON, J., & LORKE, A. (2018). Triangulation hand-held laser-scanning (TriHaLaS) for micro-and meso-habitat surveys in streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(6), 1241-1251.

PALMER, M. A.; MENNINGER, H. L.; & BERNHARDT, E. (2010). River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: a failure of theory or practice? *Freshwater Biology*, 55, 205-222.

R CORE TEAM (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.

REID, Andreia J. et al. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biological Reviews*, v 94, n.3, p. 849-873, 2019.

SILVA-JUNIOR, Eduardo F. et al. Leaf decomposition and ecosystem metabolism as functional indicators of land use impacts on tropical streams. *Ecological Indicators*, v. 36, p. 195-204, 2014

SMITH, Benjamin; CLIFFORD, Nicholas J.; MANT, Jenny. The changing nature of river restoration. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 1, n. 3, p. 249-261, 2014.

STHLE, L., & WOLD, S. (1989). Analysis of variance (ANOVA). *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 6(4), 259–272. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80095-4](https://doi.org/10.1016/0169-7439(89)80095-4)

VANDENBERGHE, J. (2015). River terraces as a response to climatic forcing: formation processes, sedimentary characteristics and sites for human occupation. *Quaternary international*, 370, 3-1.

VERDONSCHOT, Ralf CM et al. The role of benthic microhabitats in determining

the effects of hydromorphological river restoration on macroinvertebrates. *Hydrobiologia*, v. 769, p. 55-66, 2016.

WHITTAKER, Robert H. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, v. 21, n. 2-3, p. 213- 251, 1972.

HAUER, F.R. & LAMBERTI, G. (2017). Methods in stream ecology. New York, Elsevier

YOUNG, R.G. & HURYN, A.D. (1999). Effects of land use on stream metabolism and organic matter turnover. *Ecological Applications*, 9, 1359–1376.

WOHL, E.; LANE, S. N.; & WILCOX, A. C. (2015). The science and practice of river restoration. *Water Resources Research*, (8), 5974-5997.

WOHL, Ellen. Forgotten legacies: Understanding and mitigating historical human alterations of river corridors. *Water Resources Research*, v. 55, n. 7, p. 5181-5201, 2019.

WOOLSEY, Sharon et al. A strategy to assess river restoration success. *Freshwater Biology*, v. 52, n. 4, p. 752-769, 2007.