



**ROBERTO COELHO DINIZ LOPES DE SOUSA**

**ASPECTOS TRÔFICOS DA ICTIOFAUNA DO RIO  
PARAOPEBA E RIO DAS VELHAS: UMA ABORDAGEM  
UTILIZANDO A FERRAMENTA DE ISÓTOPOS ESTÁVEIS  
PARA DOIS RIOS IMPACTADOS**

**LAVRAS - MG**

**2023**

**ROBERTO COELHO DINIZ LOPES DE SOUSA**

**ASPECTOS TRÔFICOS DA ICTIOFAUNA DO RIO PARAÓPEBA E RIO DAS  
VELHAS: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO A FERRAMENTA DE ISÓTOPOS  
ESTÁVEIS PARA DOIS RIOS IMPACTADOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, área de concentração em Ecologia e Conservação de Recursos em Paisagens Fragmentadas e Agrossistemas, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr Paulo dos Santos Pompeu  
Orientador

Dra. Débora Reis de Carvalho  
Coorientadora

**LAVRAS - MG  
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Sousa, Roberto Diniz.

Aspectos tróficos da ictiofauna do Rio Paraopeba e Rio das Velhas: Uma abordagem utilizando a ferramenta de isótopos estáveis para dois rios impactados / Roberto Diniz Sousa. - 2024.  
52 p.

Orientador(a): Paulo dos Santos Pompeu.

Coorientador(a): Débora Reis de Carvalho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Barragem de rejeito. 2. Ictiofauna. 3. Poluição. I. Pompeu, Paulo dos Santos. II. de Carvalho, Débora Reis. III. Título.

**ROBERTO COELHO DINIZ LOPES DE SOUSA**

**ASPECTOS TRÓFICOS DA ICTIOFAUNA DO RIO PARAOPEBA E RIO DAS  
VELHAS: UMA ABORDAGEM COMPARATIVA UTILIZANDO A FERRAMENTA  
DE ISÓTOPOS ESTÁVEIS PARA DOIS RIOS IMPACTADOS**

**TROPHIC ASPECTS OF THE ICHTHIOFAUNA OF THE PARAOPEBA RIVER  
AND RIO DAS VELHAS: A COMPARATIVE APPROACH USING THE STABLE  
ISOTOPE TOOL FOR TWO IMPACTED RIVERS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, área de concentração em Ecologia e Conservação de Recursos em Paisagens Fragmentadas e Agrossistemas, como requisito para obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 30 de janeiro de 2024  
Dr. Paulo dos Santos Pompeu - UFLA  
Dr. Marco Aurelio Leite Fontes - UFLA  
Dra. Larissa Fonseca de Andrade Vieira - UFLA

Prof. Dr. Paulo dos Santos Pompeu  
Orientador

Dr. Débora Reis de Carvalho  
Coorientadora

**LAVRAS-MG  
2024**

*Às jóias, e seu eterno brilho.  
Aos meus conterrâneos, sua dor e seu luto.  
Dedico*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, à CAPES e à Vale S.A. pela oportunidade, viabilização e recursos necessários para o desenvolvimento do presente trabalho.

## RESUMO

A utilização de isótopos estáveis vem se tornando uma importante ferramenta para ecólogos e, no caso da ictiologia, vêm auxiliando na obtenção de informações acerca da comunidade de peixes e estrutura trófica de diversas bacias hidrográficas ao redor do mundo. No presente estudo reconstruímos, com a ajuda dos isótopos estáveis de carbono e nitrogênio, os nichos tróficos das assembleias de peixes de dois dos maiores afluentes do rio São Francisco no seu alto curso, o Rio Paraopeba e o Rio das Velhas. O primeiro, além de ser impactado com o lançamento de esgoto doméstico e industrial da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), também sofre com a presença de rejeitos de minério introduzido no rio a partir do rompimento da barragem B1 em Brumadinho no ano de 2019; o segundo sofre com o lançamento diário de uma grande quantidade de esgotos oriundo da RMBH. Assim, nosso objetivo principal foi avaliar o estado do rio Paraopeba quase três anos após o rompimento da barragem, comparando com um rio com histórico de degradação similar. Amostragens de peixes e de seus potenciais recursos alimentares foram realizadas em oito pontos do rio das Velhas (em 2015 e 2016) e quatro do Paraopeba (em 2021), incluindo locais a montante e a jusante das regiões impactadas. Nossos resultados indicam que o estado atual da diversidade trófica das comunidades de peixes do Rio Paraopeba, pós impacto do rompimento da barragem de rejeito, já se compara à diversidade trófica de alguns pontos na bacia do Rio das Velhas. Em alguns pontos, a comunidade apresenta maior diversidade trófica do que em locais correspondentes na bacia do Rio das Velhas que sofrem o impacto do lançamento contínuo de efluentes da RMBH. Entretanto, devido às suas características particulares, foi indicado a partir das métricas de Layman que o efeito do impacto se estende de forma mais longínqua ao longo da calha do Rio Paraopeba. Ao contrário do rio das Velhas, o Paraopeba não possui afluentes bem preservados que possam contribuir com a melhora da qualidade da água do rio e de sua ictiofauna ao longo do seu curso. Esses resultados demonstram que diferentes estratégias têm de ser utilizadas para avaliar e contornar a falta de dados prévios em caso de grandes impactos ambientais, e indica a possibilidade de usar bacias impactadas por fontes diferentes como um método válido de comparação, desde que essas tenham alto grau de similaridade de fauna, área, histórico de ações antrópicas, entre outros.

**Palavras-chave:** Poluição; Barragem; Rejeito de minério; Impacto; Peixes

## ABSTRACT

The use of stable isotopes has become an important tool for ecologists, and in the case of ichthyology, they have been assisting in obtaining information about fish communities and trophic structure in various hydrographic basins around the world. In this study, we reconstructed, with the help of stable isotopes of carbon and nitrogen, the trophic niches of fish assemblages from two of the largest tributaries of the São Francisco River in its upper course, the Paraopeba River and the Velhas River. The former, besides being impacted by the discharge of domestic and industrial sewage from the Metropolitan Region of Belo Horizonte (RMBH), also suffers from the presence of ore tailings introduced into the river following the rupture of the B1 dam in Brumadinho in 2019; the latter suffers from the daily discharge of a large amount of sewage from the RMBH. Thus, our main objective was to evaluate the state of the Paraopeba River nearly three years after the dam rupture, comparing it with a river with a similar degradation history. Fish and their potential food resources were sampled at eight points along the Velhas River (in 2015 and 2016) and four points along the Paraopeba (in 2021), including upstream and downstream locations of the impacted regions. Our results indicate that the current state of trophic diversity in the fish communities of the Paraopeba River, post-impact of the tailings dam rupture, already compares to the trophic diversity of some points in the Velhas River basin. In some points, the community exhibits greater trophic diversity than corresponding locations in the Velhas River basin that are impacted by continuous effluent discharge from the RMBH. However, due to its particular characteristics, it was indicated from Layman metrics that the impact extends further along the Paraopeba River channel. Unlike the Velhas River, the Paraopeba does not have well-preserved tributaries that can contribute to improving water quality and ichthyofauna along its course. These results demonstrate that different strategies need to be used to evaluate and address the lack of previous data in the case of major environmental impacts and indicate the possibility of using basins impacted by different sources as a valid method of comparison, provided they have a high degree of similarity in fauna, area, history of anthropogenic actions, among others.

Keywords: Pollution; Dam; Ore tailings; Impact; Fish

## SUMÁRIO

RESUMO .....	7
1. INTRODUÇÃO .....	7
2. METODOLOGIA .....	9
2.1. Área de estudo .....	9
2.2. Amostragem.....	7
2.3. Coleta de peixes .....	7
2.4. Coleta de recursos alimentares .....	8
3. ANÁLISE DE DADOS.....	9
3.1. Análise isotópica .....	9
3.2. Análises estatísticas .....	10
4. RESULTADOS.....	11
4.1. Abundância e riqueza de guildas tróficas .....	14
4.2. Similaridade entre a composição em espécies do Rio Paraopeba e Rio das Velhas	16
4.3. Estrutura trófica das comunidades de peixes do rio Paraopeba e Rio das Velhas..	17
4.4. Comparação entre a diversidade trófica dos dois rios .....	24
5. DISCUSSÃO .....	32
5.1. Abundância e riqueza de guildas tróficas .....	32
5.2. Similaridade entre a composição em espécies do Rio Paraopeba e Rio das Velhas	33
5.3. Estrutura trófica das comunidades de peixes do rio Paraopeba e Rio das Velhas..	34
5.4. Comparação entre diversidade trófica dos dois rios .....	36
3. CONCLUSÃO .....	37
REFERÊNCIAS .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas em estudos ictiológicos de grandes impactos ambientais é a falta de dados pretéritos ao impacto, ou seja, estudos que forneceria uma linha de base robusta para comparações entre o pré e pós (TURAK et al., 2017). Dessa forma o estabelecimento de locais de referência é recorrentemente utilizado como uma alternativa para contornar a falta de dados. Entretanto, os locais de referência nem sempre refletem a verdadeira situação do rio alvo, seja por diferenças nas vazões, no uso e ocupação do solo na região ou na comunidade íctia, entre outros fatores (REID et al., 2019).

Entre os recentes impactos em grande escala sofridos pela fauna de peixes de rios brasileiros, se destacam os rompimentos de barragens de minério, os quais lançaram grandes quantidades de rejeitos aos corpos d'água (LASCHEFSKI, 2020). Em 25 de janeiro de 2019 ocorreu o rompimento da barragem B1, localizada na mina do Córrego do feijão, um complexo mineração de propriedade da empresa Vale S.A. no município de Brumadinho-MG. O rejeito de minério seguiu pela área de relevo mais baixa que coincide com o curso de um pequeno afluente conhecido como ribeirão ferro-carvão e, posteriormente, foi depositado em um ponto do rio Paraopeba conhecido como marco zero, sendo então carregado pela drenagem (FUNDAJ, 2021). Conseqüentemente, após esse grande desastre ambiental, se tornou de extrema importância o acompanhamento da região atingida, avaliando todos impactos sobre os ambientes aquático e terrestre, assim como nos organismos ali presentes.

O Rio Paraopeba possuía até então poucos estudos de caracterização da sua ictiofauna (ALVES & VONO, 1998; ALVES, 2012;) e ainda menos em relação as condições ambientais do rio. Sendo assim, seria necessário para entendimento dos impactos ambientais decorrentes do rompimento da barragem um local com características similares de vazão, fauna e geologia, de forma a permitir possíveis comparações e avaliações dos impactos ocorridos em Brumadinho. Como o Rio Paraopeba não possui afluentes de porte parecido, surgiu como opção o uso de uma bacia vizinha. Dentre estas, destaca-se a bacia do rio das Velhas, que também sofre com um grande impacto ambiental, o lançamento de esgoto oriundo da capital mineira, Belo Horizonte, e que, assim como o Paraopeba, tem suas cabeceiras drenando a região do quadrilátero ferrífero (VIEIRA, 2015).

Dentre as formas de avaliação das condições ecológicas de uma comunidade aquática, destaca-se o uso de isótopos estáveis, em especial dos elementos carbono e nitrogênio. O carbono tem como sua principal fonte de entrada em um sistema os ciclos fotossintéticos das

plantas, que podem ser C3, C4 ou CAM (EHLERINGER, 1993). Cada um destes ciclos produz proporções diferentes de  $^{13}\text{C}$  e  $^{12}\text{C}$  (ALBRECHT et al. 2021). Como a transferência da assinatura isotópica de carbono ao longo da teia trófica é conservativa, a proporção destes isótopos ( $\delta^{13}\text{C}$ ) pode ser utilizada para traçar o fluxo de energia em sistemas onde existem vários tipos de recursos alimentares, determinando assim a composição alimentar de cada espécie. Já o nitrogênio não é produzido no tecido vegetal. Na maioria dos casos ele é retirado da atmosfera e fixado no solo por microrganismos, ficando então disponível para a absorção das plantas nas formas de amônio e nitrato (NAVOA & LOOMIS, 1981). Por outro lado, o isótopo de Nitrogênio ( $\delta^{15}\text{N}$ ) é fracionado consistentemente ao longo da teia trófica, possibilitando inferências sobre as relações tróficas dos consumidores com a sua dieta, e na determinação da posição trófica ocupada pela espécie (POST, 2002). Juntos, os dois isótopos são os mais utilizados em estudos com teias e nichos tróficos principalmente devido a sua capacidade de determinação das fontes de alimento para consumidores em teias alimentares aquáticas e terrestres (BOUTTON, 1991; LAKE, 2001). Além de possibilitar a determinação de níveis tróficos e das principais fontes de energia para a comunidade, dados de assinatura isotópica de carbono e nitrogênio permitem o cálculo de métricas de diversidade trófica de cada comunidade (Layman et al. 2007), servindo de ferramenta para o entendimento do grau de conservação do sistema estudado (DE CARVALHO et al., 2020, 2021).

Trabalhos anteriores na bacia do Rio das Velhas utilizaram os isótopos estáveis de Carbono e Nitrogênio para avaliar o impacto de diferentes atividades antrópicas, em especial o despejo de esgoto doméstico e industrial sobre a ictiofauna (DE CARVALHO, 2020; 2023). Entretanto, estudos que procuram avaliar mudanças isotópicas em função de desastres ambientais, como rompimentos de barragens de minério, ainda são incipientes, ocorrendo principalmente para a região estuarina da Bacia do rio Doce (*e.g.* Andrades et al. 2021, Andrades et al. 2020), também atingida por um rompimento de barragem de rejeitos no município de Mariana-MG em 2015 (SANCHEZ, 2018).

Com o objetivo de melhor compreender os efeitos do rompimento da barragem B1 na fauna de peixes do rio Paraopeba, este estudo buscou caracterizar por meio da análise dos isótopos estáveis de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) e nitrogênio ( $\delta^{15}\text{N}$ ) a ecologia trófica da assembleia de peixes dessa bacia pouco estudada. Além disso, objetivamos também comparar a estrutura trófica do rio Paraopeba com a bacia do rio das Velhas, uma bacia vizinha e sob influência de distúrbios antrópicos similares.

Testamos inicialmente se as duas bacias podem ser, de fato, comparadas, procurando parear suas regiões em função da composição de espécies e suas respectivas guildas tróficas. Era esperado que os dois rios apresentassem o seu alto curso mais degradado, uma vez que os principais impactos antrópicos ocorrem nessa área, refletindo em nichos isotópicos mais estreitos e menor diversidade trófica, um padrão já observado para rios médios impactados por ações humanas (WINEMILLER, 2011). Ainda, era esperado que a qualidade ambiental melhorasse à medida que se afastam das regiões mais degradadas, devido a mudanças químicas nos agentes poluidores e melhoria da qualidade da água, aumento da vazão e mudanças ambientais locais.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1. Área de estudo**

O presente estudo contemplou dois dos maiores afluentes da parte alta da bacia do rio São Francisco, o Rio das Velhas e o Rio Paraopeba (CETEC, 1983), que juntos ocupam com suas respectivas bacias quase a totalidade das drenagens da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (Figura 01). As duas sub-bacias também drenam, através de suas cabeceiras, a região do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais. Por sua grande diversidade e importância para o rio São Francisco, estas sub-bacias são historicamente consideradas importantes áreas para conservação e restauração no estado de Minas Gerais (COSTA, 1998 e LISBOA, 1997).

O Rio Paraopeba tem aproximadamente 510 km de extensão e sua bacia possui área de drenagem de 12.054 km<sup>2</sup>, englobando 48 municípios do estado de Minas Gerais. A maior problemática histórica da bacia está relacionada a atividades minerárias em seu entorno e lançamento de esgoto doméstico em seus cursos d'água, com destaque para o rio Betim, um dos seus principais afluentes (IGAM, 2023), que recebe efluentes das cidades centrais da RMBH.

Em 25 de janeiro de 2019 ocorreu o rompimento da barragem B1, localizada na mina do Córrego do feijão, um complexo minerário de propriedade da empresa mineradora Vale S.A. no município de Brumadinho-MG. A área total afetada foi de 292,27 ha, suprimindo 150,7 ha de vegetação (IEF, 2019). O volume liberado foi aproximadamente de 12 milhões de m<sup>3</sup> de

rejeitos, o que impactou diretamente a ictiofauna local, ao cobrir parcialmente vários cursos d'água como o Ribeirão Ferro Carvão, curso d'água mais afetado, e chegar ao Rio Paraopeba causando mortandade de grande número de peixes (IBAMA & IEF, 2019).

Nesta sub-bacia foram amostrados quatro pontos ao longo da calha principal do rio (P1 a P4) (Figura 01), sendo que o primeiro (P1) se encontra à montante de onde o rejeito proveniente do rompimento da barragem B1 alcançou o rio, porém um local já impactado por ação antrópica. O segundo ponto (P2) está localizado imediatamente a jusante do local onde o rejeito foi depositado e possui características equivalentes ao primeiro, porém tendo sido impactado pelo material oriundo do rompimento da barragem. Nos pontos P3 e P4 o Rio Paraopeba já possui maior fluxo d'água (Figura 01) e, apesar de localizados mais distantes da RMBH e das áreas minerárias, também recebem impactos da produção agrícola, pecuária e lançamento de esgoto doméstico das pequenas cidades ao entorno.

Já o Rio das Velhas é o maior afluente da bacia do rio São Francisco (Alves e Pompeu, 2010) e está localizado inteiramente no território do estado de Minas Gerais, Brasil, abrangendo 51 municípios ao longo de seus 801 km de extensão (Macedo e Magalhães, 2008). Em sua parte alta, está localizada a RMBH (ALMG, 2006) e por isso, a poluição nesta região provenientes de esgotos domésticos e industriais são um fator comprometedor para ictiofauna desta região (DE CARVALHO et al.,2020). As seções média e baixa da bacia do Rio das Velhas também são impactadas por atividades antrópicas, incluindo a produção agrícola e pecuária, mas o lançamento de esgoto doméstico das pequenas cidades está entre as principais fontes de poluição.

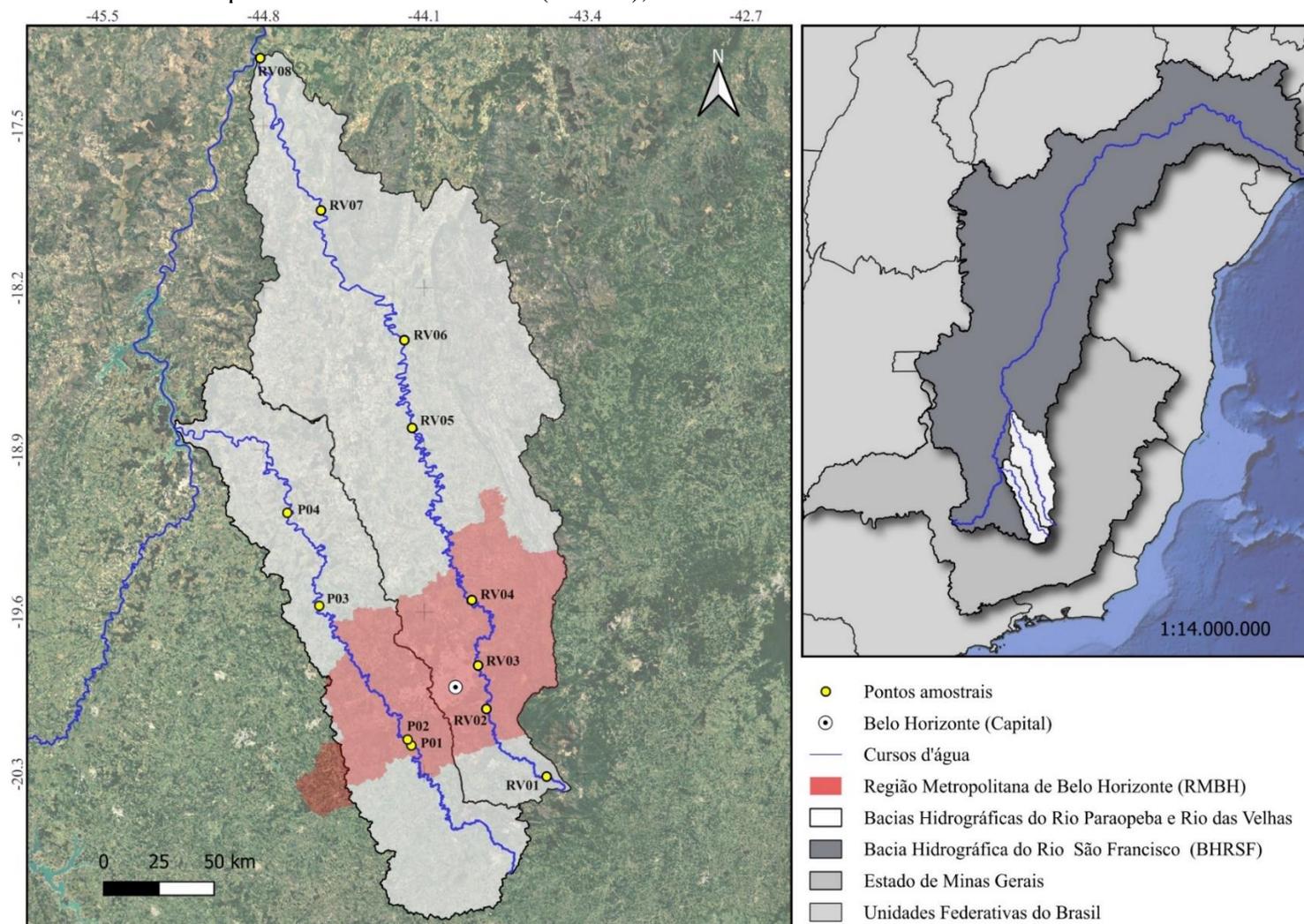
Nesta bacia foram amostrados um total de oito pontos (RV01 a RV08) ao longo da calha principal (Figura 01), sendo que o ponto RV01, localizado nas cabeceiras do rio das Velhas, pelo seu pequeno porte, possui características bastante distintas dos demais pontos. O ponto RV02 está localizado a montante da RMBH, mas já possui impactos visíveis em seu entorno, incluindo aporte de esgotos de cidades de menor porte e contribuições áreas mineradas como Nova Lima. Os pontos RV03 e RV04 são altamente influenciados pela RMBH, recebendo uma carga significativa de esgoto e conseqüentemente apresentando má qualidade da água, bem como presença de substâncias tóxicas (IGAM, 2023). Os demais pontos (RV05, RV06, RV07 e RV08) também são locais poluídos que apresentam melhoria parcial na qualidade da água à medida que aumenta a distância da RMBH, e que recebem afluentes bem preservados como os Rios Paraúna e Curimataí (ALVES & POMPEU, 2005).

**Tabela 01** - Características dos pontos amostrados nas bacias do Rio Paraopeba e Rio das Velhas

Ponto	Coord. UTM	Coord. UTM	Coordenadas	Coordenadas	Fluxo (m <sup>3</sup> /s)	Elevação (m)	Município
P01	588208	7768641	20°10' 39.36"S	44° 9' 20.96" W	64,2375	743	Brumadinho
P02	586505	7771498	20° 09' 06.7" S	44° 10' 20.1" W	66,139	735	Brumadinho
P03	546495	7835602	19° 34' 26.26" S	44° 33' 24.01" W	117,1868	670	Pequi/Fortuna de Minas
P04	531978	7880103	19° 10' 19.50" S	44° 41' 45.08" W	154,69	641	Pompéu/Curvelo
RV01	657244	7748202	20°18'42,8"S	43°34'01,5"W	0,04	1010	Ouro Preto
RV02	622614	7781258	20°01'10,7"S	43°49'45,4"W	28,28	729	Nova Lima
RV03	622614	7801721	19°49'54,8"S	43°51'56,2"W	43,14	674	Belo Horizonte/Sabarã
RV04	619466	7833202	19°32'56,7"S	43°53'33,3"W	74,46	658	Lagoa Santa/Jaboticatubas
RV05	595855	7913480	18°48'19,2"S	44°09'09,2"W	122,52	567	Curvelo/P. Juscelino
RV06	586411	7963850	18°25'33,2"S	44°11'10,9"W	196,2	552	Curvelo/Santo Hipólito
RV07	545485	8018943	17°51'55,4"S	44°32'57,4"W	272,54	495	Lassance
RV08	520300	8091350	17°12'25,9"S	44°48'49,8"W	299,96	464	Pirapora/Várzea da Palma

Fonte : Do autor (2024)

**Figura 01** - Mapa das Bacias do Rio Paraopeba e Rio das Velhas indicando os pontos de amostragem e suas posições em relação a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), Minas Gerais e a bacia do Rio São Francisco.



Fonte: Do autor.

## **2.2.Amostragem**

As amostragens no Rio das Velhas foram realizadas no período seco (julho) de 2015 e 2016, totalizando duas amostragens. Já a amostragem no Rio Paraopeba ocorreu uma única vez em cada ponto durante o início do mês de outubro de 2021, período considerado final da estação seca, quase três anos após o rompimento.

## **2.3.Coleta de peixes**

Os métodos de amostragem utilizados foram: amostragem por tarrafas (malha 5,5 cm), redes de emalhar (10 metros de comprimento, cada uma com um tamanho de malha entre 3 e 16 cm), redes de arrasto (5 m de comprimento, malha de 1 mm) e peneiras (80 cm de diâmetro, 1 mm de malha). As tarrafas foram utilizadas ao longo dos pontos em locais de profundidade elevada, com um esforço amostral de 60 arremessos ao final do período diurno. Já as redes de emalhar foram fixadas na coluna d'água em 10 locais por 13 horas durante a noite. Redes de arrasto e peneiras foram usadas em áreas rasas às margens do rio por um período de uma hora.

Após a captura, foi feita a biometria e a identificação dos indivíduos até o menor nível taxonômico possível. Foram selecionados até cinco indivíduos de cada espécie para amostragem de tecido muscular em peixes maiores que quatro centímetros. Peixes pequenos foram considerados inteiros na análise, tendo apenas seu trato gastrointestinal, cabeça e nadadeiras removidos antes do processamento. O material coletado foi mantido em gelo no campo e posteriormente congelado. No laboratório, foi feito a triagem do material de campo e a confirmação da identificação dos indivíduos através da utilização de chaves de identificação (BRITISKI, 1984; ALVES, 2010) e literatura (BARBOSA, 2017). Dados da literatura também foram utilizados na classificação das espécies quanto às suas guildas tróficas. As amostras congeladas foram liofilizadas por 24 horas, moídas em um almofariz até se tornar um pó fino e homogêneo, em seguida armazenadas em tubos do tipo Eppendorf para posterior encaminhamento há um laboratório especializado em análises isotópicas.

Nas coletas do Rio Paraopeba, entre todos os indivíduos coletados, foram usados para a análise de isótopos estáveis de C e N, 268 exemplares. O número de espécies e indivíduos de peixes analisados para isótopos estáveis variaram entre os pontos, com um número maior de espécies e indivíduos nos pontos a jusante. Do ponto P01 foram analisados 56 indivíduos de 17 espécies; do ponto P2 49 indivíduos de 17 espécies; do ponto P3 80 indivíduos de 30 espécies e e do ponto P4 75 indivíduos de 24 espécies de peixes.

Nas coletas do Rio das Velhas, entre todos os indivíduos coletados, foram usados para a análise de isótopos estáveis de C e N, 578 exemplares. O número de espécies e indivíduos de peixes analisados para isótopos estáveis variaram entre os pontos, sem apresentar um padrão contínuo de crescimento em direção a jusante. Do ponto RV01 foram analisados 41 indivíduos de 05 espécies; do ponto RV02 de 18 espécies; do RV03 34 indivíduos de 10 espécies; do RV04 47 indivíduos de 12 espécies; do RV05 91 indivíduos de 27 espécies; do RV06 101 indivíduos de 29 espécies; do RV07 106 indivíduos de 25 espécies e do RV08 67 indivíduos de 22 espécies.

#### **2.4. Coleta de recursos alimentares**

Em cada um dos pontos de amostragem, cinco amostras foram coletadas (quando disponíveis) de cada um dos seguintes recursos alimentares: algas filamentosas, perifíton, material em suspensão, sedimento, macroinvertebrados aquáticos, macroinvertebrados terrestres, macrófitas aquáticas e gramíneas, totalizando 403 amostras (nos pontos do Rio das Velhas não foram coletados macroinvertebrados).

Amostras de gramíneas foram coletadas aleatoriamente ao longo das margens do rio. Já as algas filamentosas foram recolhidas das redes de emalhar (utilizadas para captura de peixes), presas à rede fitoplanctônica (45  $\mu$  malha m), ou coletadas de forma ativa nas margens do rio. Material em suspensão foi coletado através de uma rede fitoplanctônica (45  $\mu$  malha) colocada na coluna d'água por um período de três minutos em cinco locais diferentes em cada ponto de amostragem. Os macroinvertebrados bentônicos foram coletados através de peneiras (80 cm de diâmetro, 1 mm de malha) e amostrador do tipo Surber, enquanto os terrestres foram coletados aleatoriamente na região ao entorno do curso d'água. O perifíton foi coletado por raspagem de pedras com o auxílio de uma escova e armazenado em potes plásticos com água destilada. Macrófitas aquáticas foram capturadas à deriva no rio e nas margens e o sedimento de fundo foi coletado com o auxílio de um amostrador do tipo Surber posicionado no fundo do curso d'água. O material coletado foi mantido em gelo no campo e posteriormente congelado.

No laboratório, as amostras com grande quantidade de líquido (perifíton, sedimento e material em suspensão) foram filtradas usando uma bomba de vácuo acoplada a um aparelho de filtração que usa filtros de quartzo calcinados (Whatman® WHA - 25 mm). As demais amostras foram liofilizadas por um período de 24h. Posteriormente, todas as amostras foram moídas até um pó fino e homogêneo com o auxílio de almofariz e pilão, e armazenados em

tubos do tipo Eppendorf para encaminhamento ao laboratório responsável pelas análises isotópicas.

### **3. ANÁLISE DE DADOS**

#### **3.1. Análise isotópica**

Para as amostras animais e vegetais, foram pesadas 1000 $\mu$ g em cápsula de estanho (5mm x 8mm). Após a pesagem, para determinação da composição isotópica C e N das amostras do Rio Paraopeba, as cápsulas foram introduzidas por meio de um amostrador automático no analisador elementar, Flash IRMS EA Isolink. Os gases resultantes (N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>) formados foram separados em coluna cromatográfica gasosa e analisados no espectrômetro de massa de razões isotópicas (Delta V Plus Isotope Ratio MS, Thermo Scientific, Alemanha) associado à interface de fluxo contínuo (Conflo IV, Thermo Fisher Scientific TM) na Central de Análises e Prospecção Química da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras, Minas Gerais, Brasil. As amostras do Rio das Velhas foram enviadas ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) da Universidade de São Paulo (USP), onde foi utilizado um sistema de espectrômetro de massa no modo de espectrometria de massa de razão isotópica de fluxo contínuo (CF-IRMS) com um analisador elementar Carlo Erba (CHN 1110) acoplado a um espectrômetro de massa Delta Plus (Thermo Scientific). Os dois laboratórios utilizados seguem as normas internacionais, utilizando padrões de teste para certificar o correto funcionamento dos equipamentos e confiabilidade dos resultados, estes que foram obtidos através do Software Isodat 3.0 e expressos em notação  $\delta$ , calculado pela equação:

$$\Delta (\text{amostra; padrão}) = [(R \text{ amostra}/R \text{ padrão}) - 1] \cdot 10^3$$

$\Delta$  = enriquecimento relativo da amostra em relação ao padrão. Adimensional.

R = razão isotópica da amostra e do padrão. Adimensional.

O desvio padrão das réplicas dos padrões laboratoriais internos indicaram que a precisão é melhor que 0,3 e 0,2 por mil para os isótopos N e C, respectivamente

### 3.2. Análises estatísticas

Para melhor visualizar a composição de cada um dos quatro pontos amostrais do Rio Paraopeba, foi feito um diagrama de Venn demonstrando a distribuição das espécies por ponto, e quantas espécies estão presentes em mais de um local, possibilitando a identificação de forma visual da contribuição de cada um dos pontos para a riqueza de espécies apresentada para o curso d'água.

Para entender quão similares em composição são as assembleias de peixes dos 12 pontos amostrais, foi uma análise de Cluster por método de ligação completa, também com índice de similaridade de Jaccard. A partir desses resultados, foram determinados os pontos do Rio das Velhas e do Rio Paraopeba que apresentam assembleias de peixes mais similares para posterior comparação da estrutura e diversidade trófica. As comunidades foram ainda comparadas com relação à proporção de espécies de cada guilda trófica, sendo utilizada para esta classificação dados de alimentação das espécies obtidos em literatura. A partir da classificação das espécies em seis diferentes guildas tróficas (algívoros, detritívoros, herbívoros, invertívoros, onívoros e piscívoros) foi feito uma análise gráfica, onde pode ser visualizado a proporção de indivíduos referentes a cada guilda em cada um dos pontos amostrados para o Rio Paraopeba e Rio das Velhas.

Para comparar a estrutura isotópicas das assembleias de peixes dos diferentes rios, a partir dos agrupamentos de pontos apontados pela análise anterior, indivíduos de todas as espécies de peixes foram plotados no espaço bi-plot de acordo com os valores isotópicos de carbono (eixo x) e nitrogênio (eixo y). As contribuições da fonte para as dietas dos peixes foram visualmente estimadas para os quatro pontos do Rio Paraopeba e os seus similares no Rio das Velhas, com base na similaridade com a assinatura dos recursos avaliados.

A posição trófica (PT) dos peixes foi estimada utilizando o método proposto por Vander Zanden et al. (1997):  $PT_{\text{peixe}} = [(\delta^{15}\text{N}_{\text{peixe}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{recursos}}) \div 3.4] + 2$ , onde  $\delta^{15}\text{N}_{\text{peixe}}$  = valores de  $\delta^{15}\text{N}$  dos peixes,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{recursos}}$  = valores médios de  $\delta^{15}\text{N}$  dos macroinvertebrados bentônicos em cada ponto (os quais parecem ser os recursos mais assimilados através da avaliação do gráfico bi-plot), 3.4 representa o fracionamento por nível trófico e 2 é a posição dos macroinvertebrados bentônicos na teia trófica. A posição trófica foi calculada para cada indivíduo de todas espécies estudadas. Para determinar se houve variação nos níveis tróficos ocupados pelas espécies nos diferentes pontos foi realizada uma análise de variância (Kruskal-Wallis, uma vez que os pressupostos da normalidade não foram atendidos), seguida por um teste post hoc. A variação

na distribuição das posições tróficas em cada ponto foi representada através de um gráfico violino.

Seis métricas propostas originalmente por Layman et al. (2007) e reformuladas por Jackson et al. (2011) foram calculadas, permitindo uma comparação da diversidade e ecologia trófica de cada local através do uso do pacote Stable Isotope Bayesian Ellipses em R (JACKSON et al., 2011). A amplitude de carbono (CR) representa a variação no eixo x e indica a variedade de recursos usados pela comunidade. A amplitude de nitrogênio (NR) fornece uma representação vertical da estrutura de uma teia alimentar (eixo y) e indica a distância entre os valores mais e menos enriquecidos de  $\delta^{15}\text{N}$  dos consumidores. Área isotópica total (TA) é uma representação do espaço total de nicho ocupado. A distância média ao centroide (CD) fornece uma medida do grau médio da diversidade trófica dentro de uma teia trófica e é calculada a partir da distância euclidiana de cada espécie ao centróide. A média da distância do vizinho mais próximo (MNND) representa a média das distâncias euclidianas para o vizinho mais próximo para cada espécie no espaço de bi-plot e é uma medida da densidade total da comunidade. MNND pequeno indica maior redundância trófica, ou seja, teias alimentares com uma grande proporção de espécies com ecologias tróficas semelhantes. O desvio padrão da distância do vizinho mais próximo (SDNND) fornece uma medida de uniformidade de densidade espacial e empacotamento de espécies no espaço bi-plot que é menos influenciado pelo tamanho da amostra do que o MNND. Valores baixos de SDNND sugerem uma distribuição mais uniforme de nichos tróficos.

Diferenças nos valores destas métricas entre os rios das Velhas e Paraopeba foram testadas através do teste T, e sua variação ao longo dos dois rios comparada visualmente através de gráfico de linhas.

#### **4. RESULTADOS**

Para o Rio Paraopeba foi amostrado um total de 46 espécies de peixes, já para o Rio das Velhas o número de espécies foi de 61. Todas as espécies foram classificadas quanto sua guilda alimentar e numeradas em ordem alfabética para as análises subsequentes.

**Tabela 02** - Espécies de peixes presentes no Rio Paraopeba e Rio das Velhas, nomeadas por ordem alfabética, possuindo numeração de identificação e a guilda alimentar a qual pertencem.

Peixes do Rio Paraopeba	Nº	Guilda
<i>Acestrorhynchus lacustris</i>	1	Piscívoros
<i>Apareiodon hasemani</i>	2	Algívoros
<i>Astyanax lacustris</i>	3	Onívoros
<i>Bergiaria westermanni</i>	4	Detritívoros
<i>Coptodon rendalli</i>	5	Onívoros
<i>Curimatella lepidura</i>	6	Detritívoros
<i>Eigenmannia besouro</i>	7	Invertívoros
<i>Geophagus brasiliensis</i>	8	Onívoros
<i>Gymnotus carapo</i>	9	Invertívoros
<i>Hemigrammus marginatus</i>	10	Invertívoros
<i>Hoplias intermedius</i>	11	Piscívoros
<i>Hoplias malabaricus</i>	12	Piscívoros
<i>Hoplosternum littorale</i>	13	Detritívoros
<i>Hypostomus alatus</i>	14	Detritívoros
<i>Hypostomus francisci</i>	15	Detritívoros
<i>Hypostomus freirei</i>	16	Detritívoros
<i>Hypostomus guajupya</i>	17	Detritívoros
<i>Imparfinis minutus</i>	18	Invertívoros
<i>Knodus moenkhausii</i>	19	Onívoros
<i>Leporinus piau</i>	20	Onívoros
<i>Megaleporinus obtusidens</i>	21	Onívoros
<i>Megaleporinus reinhardti</i>	22	Onívoros
<i>Myleus micans</i>	23	Herbívoros
<i>Oligosarcus argenteus</i>	24	Piscívoros
<i>Oreochromis niloticus</i>	25	Onívoros
<i>Pachyurus francisci</i>	26	Piscívoros
<i>Pachyurus squamipennis</i>	27	Piscívoros
<i>Phalloceros uai</i>	28	Onívoros
<i>Piabarchus stramineus</i>	29	Herbívoros
<i>Piabina argentea</i>	30	Onívoros
<i>Pimelodus maculatus</i>	31	Invertívoros
<i>Pimelodus pohli</i>	32	Invertívoros
<i>Poecilia reticulata</i>	33	Onívoros
<i>Prochilodus costatus</i>	34	Detritívoros
<i>Psalidodon fasciatus</i>	35	Onívoros
<i>Pterygoplichthys ambrosetti</i>	36	Detritívoros
<i>Rhamdia quelen</i>	37	Onívoros
<i>Roeboides xenodon</i>	38	Invertívoros

Peixes do Rio das Velhas	Nº	Guilda
<i>Acestrorhynchus lacustris</i>	1	Piscívoros
<i>Anchoviella vaillanti</i>	2	Piscívoros
<i>Apareiodon hasemani</i>	3	Algívoros
<i>Apareiodon ibitiensis</i>	4	Algívoros
<i>Astyanax intermedius</i>	5	Onívoros
<i>Astyanax lacustris</i>	6	Onívoros
<i>Astyanax rivularis</i>	7	Invertívoros
<i>Astyanax taeniatus</i>	8	Onívoros
<i>Bergiaria westermanni</i>	9	Detritívoros
<i>Brycon orthotaenia</i>	10	Detritívoros
<i>Callichthys callichthys</i>	11	Onívoros
<i>Characidium fasciatum</i>	12	Invertívoros
<i>Characidium zebra</i>	13	Invertívoros
<i>Cichlasoma sanctifranciscense</i>	14	Invertívoros
<i>Coptodon rendalli</i>	15	Onívoros
<i>Crenicichla lepidota</i>	16	Invertívoros
<i>Curimatella lepidura</i>	17	Detritívoros
<i>Eigenmannia virescens</i>	18	Invertívoros
<i>Gymnotus carapo</i>	19	Invertívoros
<i>Hemigrammus marginatus</i>	20	Invertívoros
<i>Hoplias intermedius</i>	21	Piscívoros
<i>Hoplias malabaricus</i>	22	Piscívoros
<i>Hoplosternum littorale</i>	23	Detritívoros
<i>Hypostomus commersoni</i>	24	Detritívoros
<i>Hypostomus francisci</i>	25	Detritívoros
<i>Hypostomus lima</i>	26	Detritívoros
<i>Hypostomus macrops</i>	27	Detritívoros
<i>Knodus moenkhausii</i>	28	Onívoros
<i>Lepidocharax burnsi</i>	29	Invertívoros
<i>Leporellus vittatus</i>	30	Invertívoros
<i>Leporinus taeniatus</i>	31	Herbívoros
<i>Lophiosilurus alexandri</i>	32	Piscívoros
<i>Megaleporinus obtusidens</i>	33	Onívoros
<i>Megaleporinus reinhardti</i>	34	Onívoros
<i>Moenkhausia costae</i>	35	Invertívoros
<i>Myleus micans</i>	36	Herbívoros
<i>Neoplecostomus franciscoensis</i>	37	Invertívoros
<i>Oligosarcus argenteus</i>	38	Piscívoros

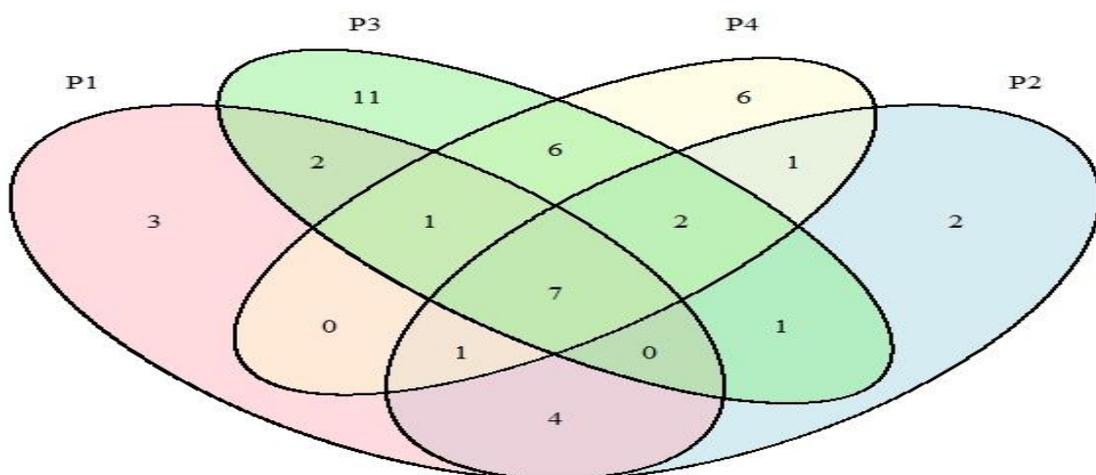
<i>Salminus hilarii</i>	39	Piscívoros
<i>Schizodon knerii</i>	40	Herbívoros
<i>Serrapinnus heterodon</i>	41	Onívoros
<i>Serrapinnus piaba</i>	42	Onívoros
<i>Serrasalmus brandtii</i>	43	Piscívoros
<i>Steindachnerina elegans</i>	44	Detritívoros
<i>Synbranchus marmoratus</i>	45	Piscívoros
<i>Triportheus guentheri</i>	46	Invertívoros

<i>Oreochromis niloticus</i>	39	Onívoros
<i>Orthospinus franciscensis</i>	40	Invertívoros
<i>Phalloceros uai</i>	41	Onívoros
<i>Piabarchus stramineus</i>	42	Herbívoros
<i>Piabina argentea</i>	43	Onívoros
<i>Pimelodus fur</i>	44	Invertívoros
<i>Pimelodus maculatus</i>	45	Invertívoros
<i>Pimelodus pohli</i>	46	Invertívoros
<i>Poecilia reticulata</i>	47	Onívoros
<i>Pygocentrus piraya</i>	48	Piscívoros
<i>Rhamdia quelen</i>	49	Onívoros
<i>Rhinelepis aspera</i>	50	Detritívoros
<i>Roeboides xenodon</i>	51	Invertívoros
<i>Salminus franciscanus</i>	52	Piscívoros
<i>Schizodon knerii</i>	53	Herbívoros
<i>Serrapinnus heterodon</i>	54	Onívoros
<i>Serrapinnus piaba</i>	55	Onívoros
<i>Serrasalmus brandtii</i>	56	Piscívoros
<i>Stegophilus insidiosus</i>	57	Parasita
<i>Steindachnerina elegans</i>	58	Detritívoros
<i>Tetragonopterus chalceus</i>	59	Invertívoros
<i>Trachelyopterus galeatus</i>	60	Invertívoros
<i>Triportheus guentheri</i>	61	Invertívoros

Fonte : Do autor (2024).

Utilizando o diagrama de Venn (Figura 02) visualizamos a composição de cada ponto amostral, e observamos que o local P02 é o que menos contribuiu para a diversidade de espécies, possuindo somente duas espécies exclusivas (*Astyanax lacustris* e *Oreochromis niloticus*), sendo duas espécies onívoras e uma delas não nativa (*O. niloticus*). Já o local que contribuiu mais para a diversidade de espécies foi o P03 que apresentou onze espécies capturadas exclusivamente neste ponto, sendo duas não nativas (*Hoplosternum littorale* e *Pterygoplichthys ambrosetti*). Todos os pontos apresentam em comum sete espécies (*Apareiodon hasemani*, *Geophagus brasiliensis*, *Hoplias intermedius*, *Hypostomus francisci*, *Knodus moenkhausii*, *Phalloceros uai*, e *Prochilodus costatus*) sendo apenas o *Knodus* uma espécie não nativa. Esta análise não foi feita para o Rio das Velhas devido ao número maior de pontos amostrais, tornando-a de difícil interpretação.

**Figura 02** - Diagrama de Venn demonstrando a diferente composição de espécies nos quatro pontos do Rio Paraopeba.



Fonte: Do autor.

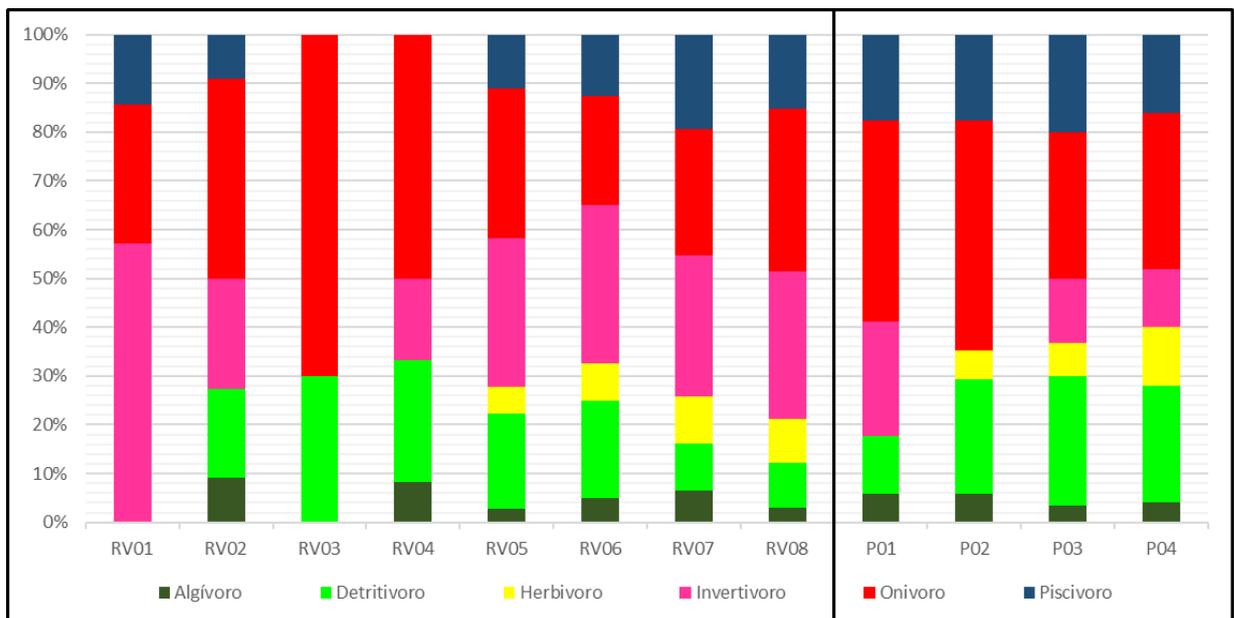
#### 4.1. Abundância e riqueza de guildas tróficas

Entre as 46 espécies identificadas no rio Paraopeba a maior parte foi classificada como onívora (15 espécies), seguida por detritívora (10 espécies), piscívora (9 espécies), invertívoras (8 espécies), herbívoras (3 espécies) e algívora (1 espécie). Em relação ao Rio das Velhas, a maioria das espécies foram classificada como invertívora (24 espécies), seguida por onívora

(19 espécies), detritívora (12 espécies), piscívora (9 espécies), herbívora (4 espécies), algívora (2 espécies) e parasita (1 espécie).

Mudanças na proporção de cada guilda ao longo do gradiente de ambos os rios foram observadas. Como a espécie identificada como parasita foi identificada apenas em um dos 12 pontos, esta foi excluída desta análise (Figura 03).

**Figura 03** - Proporção de guildas tróficas para cada um dos 12 pontos amostrados nas bacias do Rio Paraopeba (P01 a P04) e do Rio das Velhas (RV01 a RV08).



Fonte: Do autor.

O Ponto RV01 apresenta diferenças significativas do restante dos locais mostrados, contando apenas com 3 guildas e tendo espécies invertívoras como guilda principal. Nos pontos a montante do contato com a carga de esgoto no Rio das Velhas e a montante do ponto de encontro do rejeito com o rio Paraopeba, respectivamente RV02 e P01, temos proporção parecida entre as guildas sendo os únicos pontos com dominância de espécies onívoras seguidas por invertívoras.

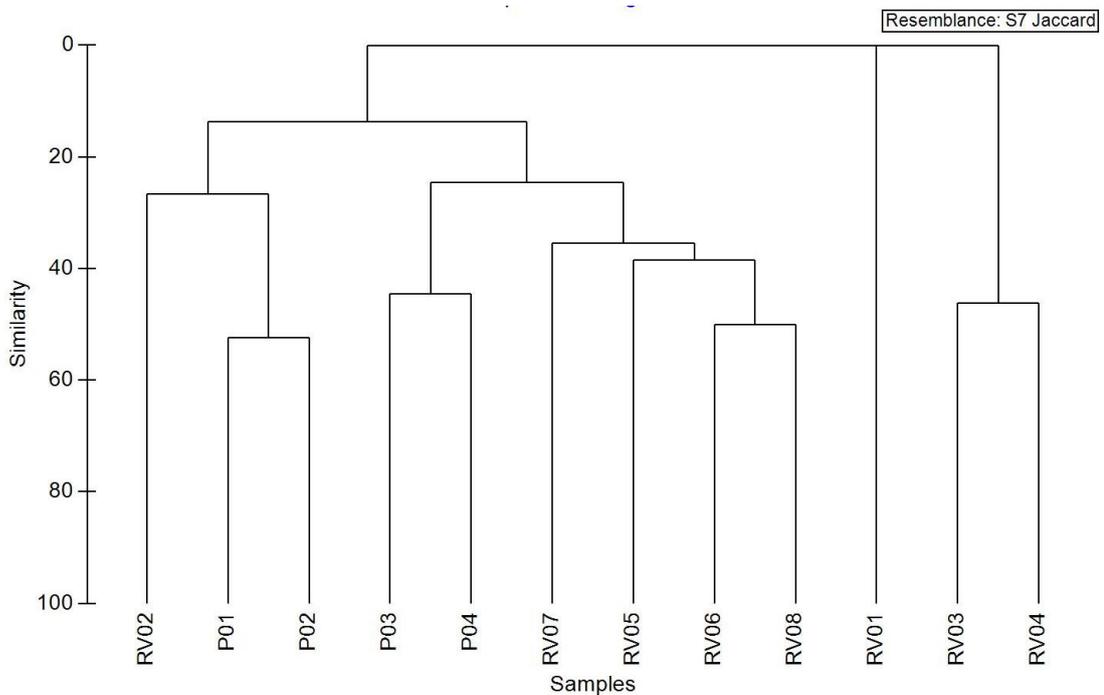
Os Pontos RV03 e RV04 são os únicos que não apresentam espécies piscívoras, possuindo a menor variedade guildas e uma composição de respectivamente 70% e 50% espécies onívoras. O ponto imediatamente após o local onde o rejeito foi depositado no Paraopeba (P02) apresenta como característica a ausência de invertívoros e uma maior dominância de espécies onívoras, algo que, no rio das Velhas, só ocorre no ponto localizado

imediatamente após o recebimento dos efluentes da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RV03). Os pontos subsequentes dos rios (RV05, RV06, RV07, RV08 e P03, P04) possuem características muito similares entre si, com uma pequena diferença na proporção entre guildas, principalmente entre invertívoros no Rio das Velhas e detritívoros no Rio Paraopeba.

#### 4.2. Similaridade entre a composição em espécies do Rio Paraopeba e Rio das Velhas

Quando comparados os pontos de coleta dos rios Paraopeba e Velhas com relação à sua composição em espécies, observamos que os pontos P01 e P02 do rio Paraopeba se agruparam e tem maior similaridade com o ponto RV02. Já os pontos P03 e P04 do Paraopeba também se agruparam e ficaram mais próximos dos pontos RV05, RV06, RV07 e RV08 (Figuras 04). O Ponto RV01 ficou completamente isolado, tanto dos pontos do Rio Paraopeba quanto dos pontos localizados também no Rio das Velhas. Em seguida, os pontos RV03 e RV04 foram os que ficaram mais distantes dos pontos do Rio Paraopeba, mas próximos entre si e de outros pontos do Rio das Velhas.

**Figura 04** - Análise de Cluster por método de ligação completa e índice de similaridade de Jaccard formando agrupamentos entre os pontos com base na similaridade dos mesmos.

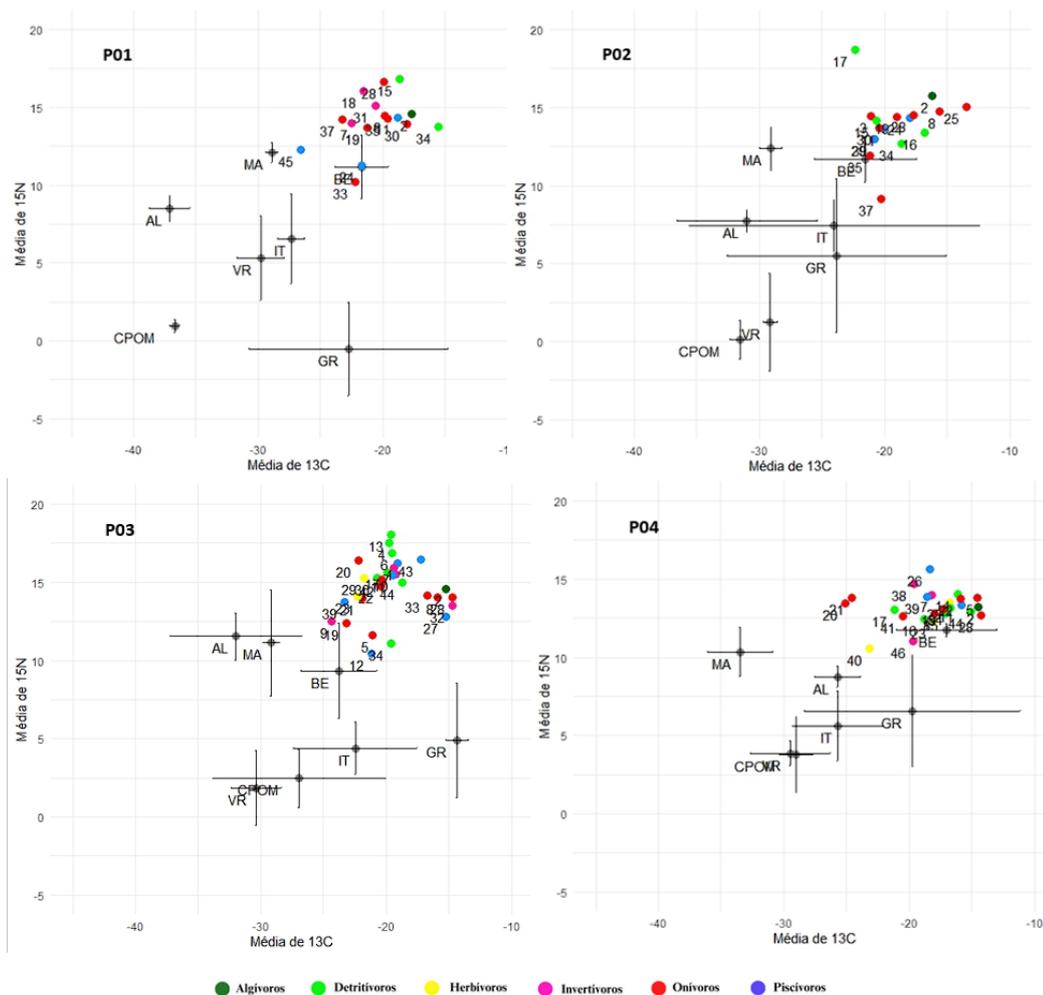


Fonte: Do autor.

### 4.3. Estrutura trófica das comunidades de peixes do rio Paraopeba e Rio das Velhas

Comparando-se a estrutura trófica dos quatro pontos amostrais no Rio Paraopeba (Figura 05), observa-se que alguns dos consumidores primários (detritívoros, herbívoros e algívoros) foram mais enriquecidos em  $^{15}\text{N}$  do que os consumidores terciários (Piscívoros). As espécies com os menores valores  $^{15}\text{N}$  foram *Poecillia reticulata*; *Rhamdia quelen*; *Hoplias malabaricus* e *Schizodon knerii*.

**Figura 05** - Biplots baseado nos valores isotópicos de carbono (eixo x) e nitrogênio (eixo y) de peixes e recursos basais representando a estrutura trófica das assembleias de peixes dos pontos amostrais do Rio Paraopeba. AL = Algas, MA = Macrófitas, BE = Macroinvertebrados Bentônicos, IT = invertebrados Terrestres, VR= Vegetação Ripária, CPOM= Material particulado grosso, GR = Gramínea.

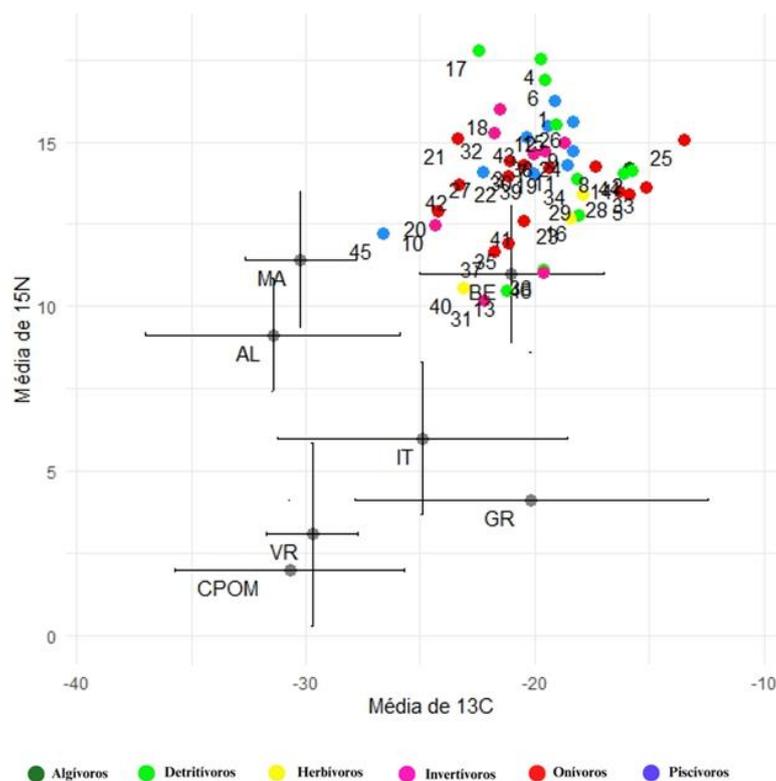


Fonte: Do autor.

Entre os recursos, na maioria dos pontos tivemos macrófitas (MA) e invertebrados bentônicos (BE) como os mais enriquecidos em  $^{15}\text{N}$ , apresentando também pouca variação nos seus valores isotópicos entre os pontos amostrados (Figura 05). Na maioria dos pontos, gramíneas (GR) e macroinvertebrados bentônicos (BE) se mostraram as mais enriquecidas em valores de  $^{13}\text{C}$ , com pouca variação. O recurso CPOM foi o menos enriquecido tanto em  $^{13}\text{C}$  quanto em  $^{15}\text{N}$  em todos os pontos, com pequena variação entre todas as localidades.

Quando agrupados todos os pontos do rio Paraopeba, é possível inferir que, possivelmente, macroinvertebrados bentônicos (BE), gramíneas (GR) e invertebrados terrestres (IT) são as principais fontes de recursos assimilados, direta ou indiretamente (Figura 06). Observa-se também, que não existe separação evidente entre as guildas alimentares observadas.

**Figura 06** - Biplots baseado nos valores isotópicos de carbono (eixo x) e nitrogênio (eixo y) de peixes e recursos basais representando a estrutura trófica das assembleias de peixes do Rio Paraopeba. AL = Algas, MA = Macrófitas, BE = Macroinvertebrados Bentônicos, IT = invertebrados Terrestres, VR= Vegetação Ripária, CPOM= Material particulado grosso, GR = Gramínea. Informação. O nome e numeração das espécies se encontra em material suplementar.

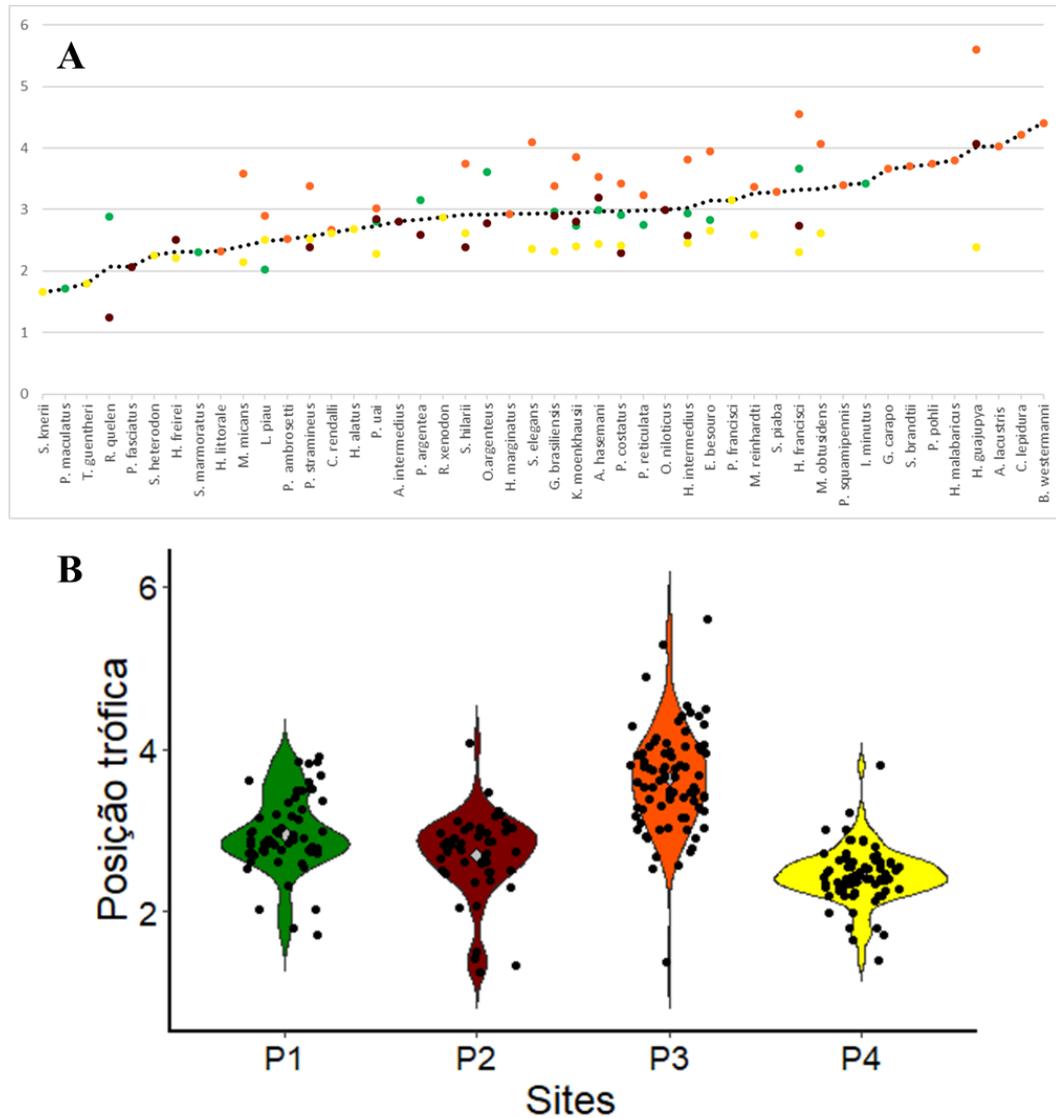


Fonte: Do autor.

As posições tróficas dos peixes do rio Paraopeba variaram entre 1.25 (*Rhamdia quelen* no P02) e 5.59 (*Hypostomus guajupya* no P03) (Figura 07A). Entretanto, observa-se que houve grande variação intraespecífica na posição trófica ocupada por algumas espécies em cada ponto. *Hypostomus francisci*, uma espécie amostrada em todos os pontos, por exemplo, ocupou posições tróficas variando entre 2.73 (P02) e 4.56 (P03). Ao se avaliar a variação nas posições tróficas entre pontos, nota-se que, com a exceção de P1 e P2 ( $p = 0.11$ ), todos os pontos foram diferentes entre si (Kruskal-Wallis chi-squared = 141.13,  $df = 3$ ,  $p\text{-value} < 2.2e-16$ ) (Figura 07B). De forma geral, os peixes ocuparam posições tróficas maiores no P03, com valores bem distanciados da posição trófica média de cada espécie. Em contrapartida, os pontos P02 e P04 apresentam tendência oposta, com grande maioria dos indivíduos coletados ali, apresentando média de posição trófica abaixo da média da espécie (Figura 07A).

O P03 também foi o ponto em que os peixes apresentaram posições tróficas mais heterogêneas, possuindo uma proporção mais parecida entre o número de ocupantes de cada posição trófica, enquanto os demais pontos apresentaram uma proporção maior de indivíduos ocupando posições tróficas intermediárias (Figura 07B). Apesar de alguns peixes do P02 ocuparem as menores posições tróficas, a menor média de posição trófica foi observada no ponto P04.

**Figura 07 - A:** Variação na posição trófica ocupada pelas espécies de peixes entre os pontos do Rio Paraopeba; **B:** Média de posição trófica por espécie em cada um dos quatro pontos do Rio Paraopeba.



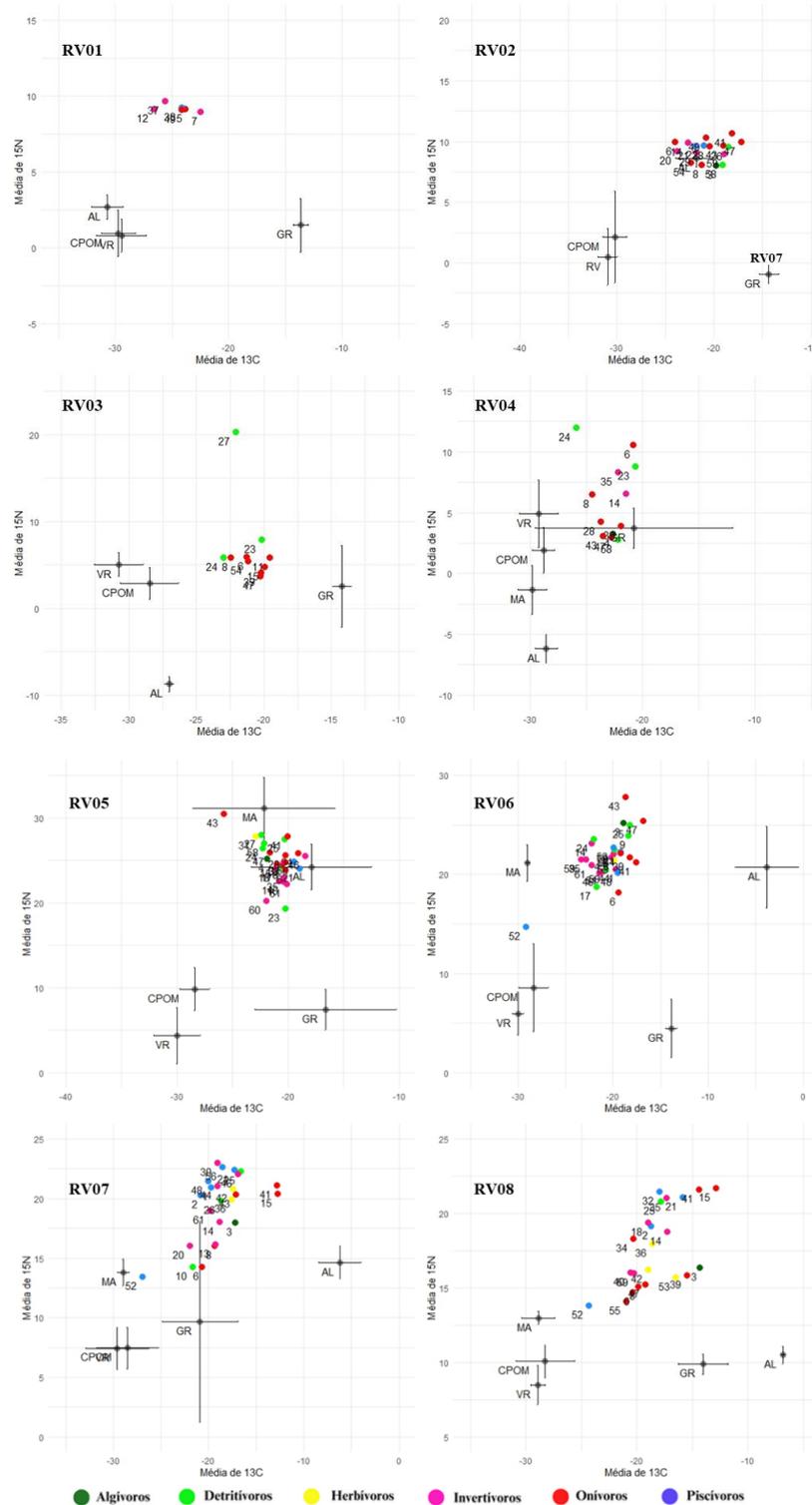
Fonte: Do autor.

Comparando-se a estrutura trófica dos oito pontos amostrais no Rio das Velhas (Figura 08), observa-se que alguns dos consumidores primários (detritívoros) foram mais enriquecidos em  $^{15}\text{N}$  do que os consumidores terciários (Piscívoros) nos pontos RV05 e RV06, onde a espécie que apresentou maior valor de  $^{15}\text{N}$  foi a onívora, *Piabina argentea* (nº 53). As detritívoras também possuíam maior enriquecimento de  $^{15}\text{N}$  nos pontos sem presença de piscívoras (RV03 e RV04).

Entre os recursos, tivemos uma alta variação entre os mais enriquecidos em  $^{15}\text{N}$ , onde as algas foram desde o recurso mais enriquecido (RV02) ao com menor enriquecimento (RV04), apresentando também muita variação nos seus valores isotópicos entre os demais pontos amostrados (Figura 08). Na maioria dos pontos, gramíneas (GR) se mostraram as mais enriquecidas em valores de  $^{13}\text{C}$ , com pouca variação. O recurso CPOM apresentou pequena variação entre todas as localidades.

Para os pontos do Rio das Velhas não é possível inferir visualmente quais recursos são as principais fontes de assimilação, direta ou indiretamente, pois em cada um dos oito pontos temos diferentes arranjos de contribuição para a ictiofauna, tanto  $^{13}\text{C}$  quanto em  $^{15}\text{N}$ . Observa-se também, que não existe separação evidente entre as guildas alimentares observadas.

**Figura 08** - Biplots baseado nos valores isotópicos de carbono (eixo x) e nitrogênio (eixo y) de peixes e recursos basais representando a estrutura trófica das assembleias de peixes dos pontos amostrais do Rio Paraopeba. AL = Algas, MA = Macrófitas, BE = Macroinvertebrados Bentônicos, IT = invertebrados Terrestres, VR= Vegetação Ripária, CPOM= Material particulado grosso, GR = Gramínea.

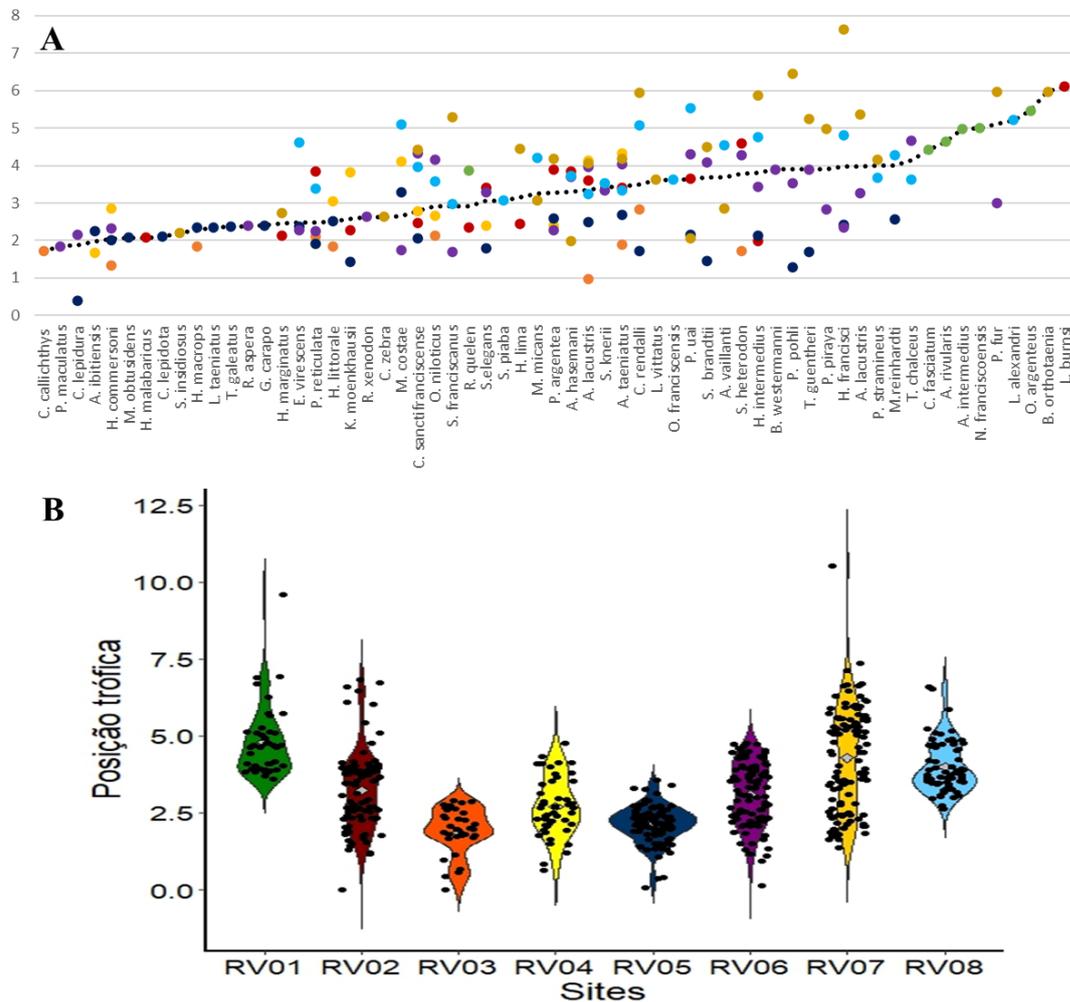


Fonte: Do autor.

As posições tróficas dos peixes do Rio das Velhas variaram entre 0.37 (*Curimatella lepidura*– RV03) e (*Hypostomus francisci* - RV07) (Figura 09A). Observa-se que houve grande variação intraespecífica na posição trófica ocupada por algumas espécies em cada ponto. *Astyanax lacustris*, uma espécie amostrada em sete pontos (apenas não foi amostrada no RV01), ocupou posições tróficas variando entre 0.98 (RV03) e 4.13 (RV04). Ao se avaliar a variação nas posições tróficas entre pontos, nota-se que a maioria foi diferentes entre si, entretanto tivemos alguns que apresentaram valores indicativos de homogeneidade no teste estatístico (RV03/RV04 = 0.00709; RV04/RV05= 0.01082; RV07/RV02= 0.00158; RV08/ RV01 e RV02) (Figura 09B). De forma geral, os peixes ocuparam posições tróficas maiores no RV08, com valores bem distanciados da posição trófica média de cada espécie. Em contrapartida, os pontos RV03 e RV05 apresentam tendência oposta, com grande maioria dos indivíduos coletados ali, apresentando média de posição trófica abaixo da média da espécie (Figura 09A).

Os pontos RV02, RV06 e RV07 foram os que apresentaram posições tróficas mais heterogêneas, possuindo uma proporção mais parecida entre o número de ocupantes de cada posição trófica, enquanto os demais pontos apresentaram uma proporção maior de indivíduos ocupando posições tróficas intermediárias (Figura 09B). Os pontos RV01 e RV08 apresentaram as posições tróficas de sua comunidade de forma piramidal, o que significa que a mais espécies ocupando posições tróficas inferiores, e gradativamente esse número é reduzido até as posições tróficas mais elevadas.

**Figura 9 - A:** Variação na posição trófica ocupada pelas espécies de peixes entre os pontos do Rio das Velhas; **B:** Média de posição trófica por espécie em cada um dos oito pontos do Rio das Velhas



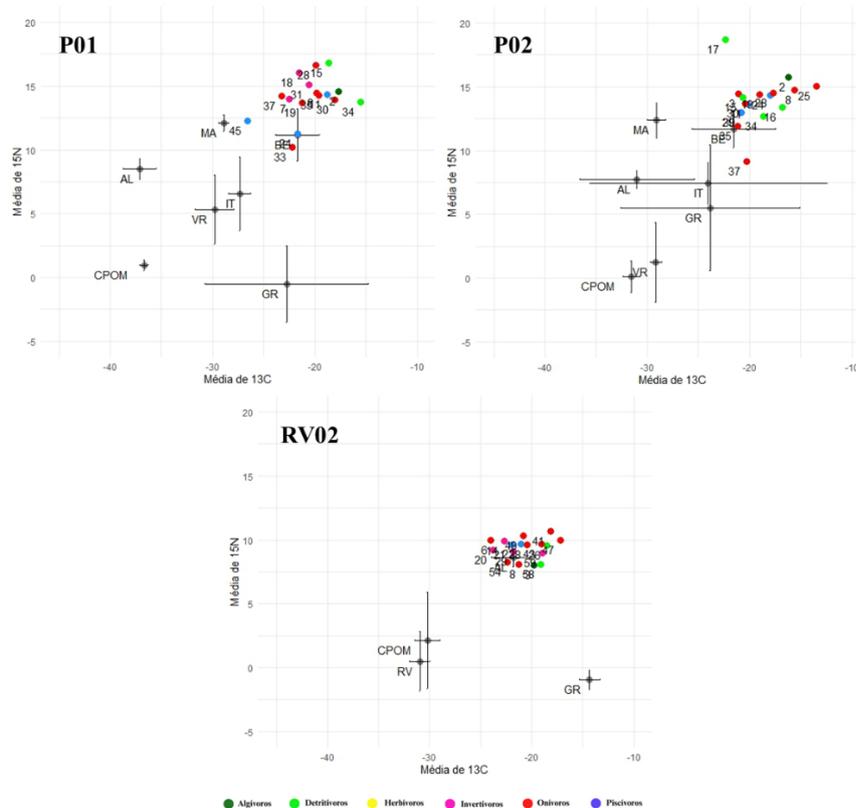
Fonte: Do autor.

#### 4.4. Comparação entre a diversidade trófica dos dois rios

A partir dos padrões de similaridade das assembleias dos Rios Paraopeba e Velhas (Cluster), comparamos a estrutura trófica dos dois grupos de pontos considerados similares entre si: pontos da porção alta de cada bacia (P01 e P02 x RV02); e pontos da porção baixa (P03 e P04 x RV05, RV06, RV07 e RV08). Apesar da assembleia ser similar entre os pontos P01, P02 e RV02, nota-se que a estrutura trófica é diferente (Figura 08). Nos pontos do rio Paraopeba, as espécies são mais distribuídas no espaço bi-plot, enquanto no Rio das Velhas elas estão mais agrupadas. Peixes do Paraopeba também apresentam valores de  $^{15}\text{N}$  mais enriquecidos dos que os peixes do Rio das Velhas. O recurso que sustenta a comunidade

também parece ser diferente, sendo que bentos (BE) parecem ser mais assimilados no Paraopeba, enquanto as algas (AL) parecem ser o principal recurso no Rio das Velhas. Vale salientar que nas coletas de 2015/2016 do Rio das Velhas os bentos não foram coletados. Entretanto, apesar de não ser possível afirmar que há variação no item preferencial, nota-se que no alto Paraopeba (P01 e P02) as algas não são um recurso tão importante quanto no alto Rio das Velhas (RV02).

**Figura 10** - Biplots baseado na média dos valores isotópicos de carbono (eixo x) e nitrogênio (eixo y) de peixes e recursos basais dos pontos P01, P02 e RV02.



Fonte: Do autor.

Com exceção das espécies de tilápia (*Oreochromis niloticus* – núm. 25 Rio Paraopeba) e mussum (*Synbranchus marmoratus* – núm. 45 Rio Paraopeba), a faixa de assimilação de carbono entre os pontos dos dois rios foi muito parecida, variando o  $^{13}\text{C}$  entre -24 e -16%. Já para o  $^{15}\text{N}$  tivemos uma variação um pouco maior no Paraopeba, com indivíduos do P01 / P02 apresentando valores entre 10 e 18%, enquanto os indivíduos do RV02 apresentaram uma faixa

de valores mais estreita, variando de 8 a 10%. Todos os recursos apresentaram variações, seja na faixa de carbono, na de nitrogênio, ou em ambas (Tabela 03).

**Tabela 03** – Médias e desvio padrão das assinaturas dos diferentes recursos nos pontos similares P01, P02 e RV02.

		IT	BE	MA	AL	CPOM	VR	GR
<b>P01</b>	Média de 13C	-27,35	-21,70	-28,92	-37,10	-36,70	-29,80	-22,74
	Média de 15N	6,57	11,18	12,10	8,52	0,97	5,33	-0,51
	DesvPad de 13C	1,07	2,16	0,47	1,65	0,42	1,87	7,97
	DesvPad de 15N	2,90	2,03	0,62	0,83	0,42	2,71	3,00
<b>P02</b>	Média de 13C	-24,05	-21,55	-29,08	-31,00	-31,55	-29,17	-23,83
	Média de 15N	7,41	11,67	12,38	7,74	0,12	1,25	5,50
	DesvPad de 13C	11,61	4,08	0,89	5,57	0,84	0,55	8,75
	DesvPad de 15N	1,65	1,48	1,38	0,70	1,22	3,14	4,92
<b>RV02</b>	Média de 13C	-	-	-	-21,78	-30,22	-30,94	-14,33
	Média de 15N	-	-	-	8,63	2,13	0,50	-0,93
	DesvPad de 13C	-	-	-	2,16	1,25	1,00	0,99
	DesvPad de 15N	-	-	-	0,69	3,78	2,33	0,78

Fonte: Do autor (2024).

Os pontos mais a jusante dos dois rios apresentaram uma série de similaridades (Figura 10), a começar pelos recursos VR e CPOM que apresentaram praticamente a mesma faixa de carbono em todos os pontos. Para a ictiofauna do Rio das velhas, com exceção do dourado (*Salminus franciscanus* – núm. 52), tivemos uma amplitude de variação de carbono entre -12 e -25‰, enquanto o Rio Paraopeba teve variação de -14 a -26‰. Para nitrogênio, observamos uma inversão do que foi visto anteriormente, com os peixes do Rio das Velhas apresentando maior amplitude de  $^{15}\text{N}$ , além de apresentarem valores muito mais enriquecidos em  $^{15}\text{N}$  do que o esperado. Para  $^{15}\text{N}$  no Rio das Velhas o houve variação de de 14 a 27‰, enquanto para o Paraopeba variou entre 10 a 18‰ (Com exceção do número 15 – *Hypostomus francisci*).

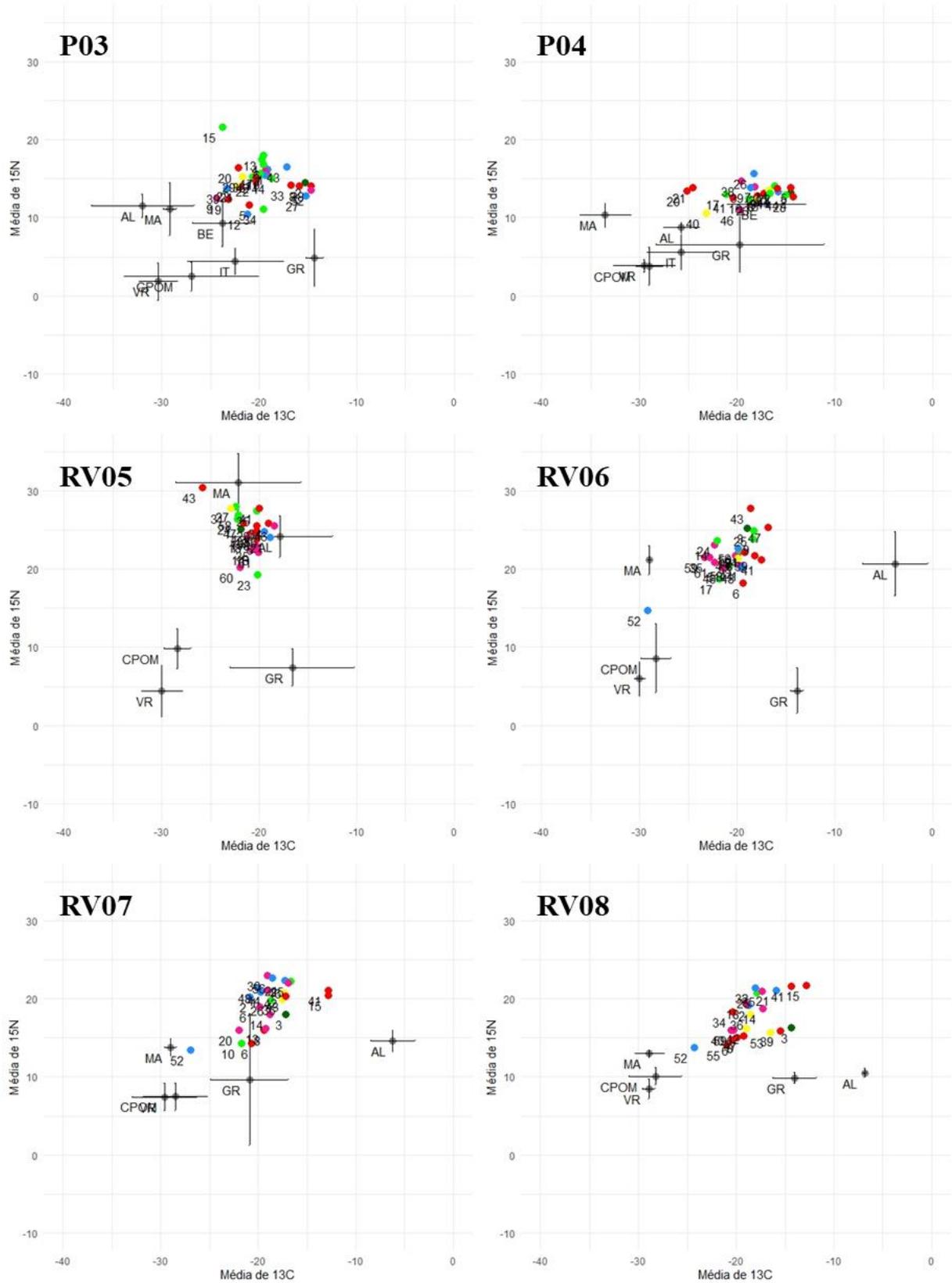
Os recursos CPOM, VR e MA apresentaram leituras similares para variação de carbono e nitrogênio nos dois rios, principalmente nos pontos RV07 e RV08 do Rio das Velhas quanto comparado aos do Paraopeba (Tabela 04). Para gramíneas a faixa de  $^{15}\text{N}$  foi muito similar entre os dois rios, variando apenas na média de  $^{13}\text{C}$ , mesmo assim sem grandes mudanças. Algas filamentosas (AL) não apresentaram nenhuma semelhança em suas composições isotópicas entre os rios, sendo muito mais enriquecida em  $^{13}\text{C}$  nos pontos do Rio das Velhas.

**Tabela 04** - Médias e desvio padrão das assinaturas dos diferentes recursos nos pontos similares P03, P04 e RV05, RV06, RV07, RV08.

		IT	BE	MA	AL	CPOM	VR	GR
<b>P03</b>	Média de 13C	-22,46	-23,77	-29,19	-31,99	-26,95	-30,36	-14,34
	Média de 15N	4,39	9,35	11,12	11,54	2,45	1,85	4,88
	DesvPad de 13C	4,92	3,05	0,69	5,26	6,89	1,98	0,88
	DesvPad de 15N	1,69	3,05	3,42	1,52	1,87	2,39	3,65
<b>P04</b>	Média de 13C	-25,71	-17,03	-33,49	-25,72	-29,01	-29,50	-19,74
	Média de 15N	5,58	11,74	10,33	8,75	3,77	3,86	6,57
	DesvPad de 13C	3,58	3,99	2,58	1,82	1,34	3,18	8,61
	DesvPad de 15N	2,24	0,41	1,56	0,68	2,44	0,82	3,55
<b>RV05</b>	Média de 13C	-	-	-22,16	-17,88	-28,40	-22,16	-16,62
	Média de 15N	-	-	31,10	24,20	9,84	31,10	7,43
	DesvPad de 13C	-	-	6,42	5,42	1,35	2,09	6,37
	DesvPad de 15N	-	-	3,66	2,67	2,53	3,30	2,42
<b>RV06</b>	Média de 13C	-	-	-29,02	-3,84	-28,34	-29,98	-13,88
	Média de 15N	-	-	21,15	20,69	8,58	5,96	4,47
	DesvPad de 13C	-	-	0,18	3,36	1,54	0,58	0,62
	DesvPad de 15N	-	-	1,83	4,11	4,40	2,15	2,93
<b>RV07</b>	Média de 13C	-	-	-28,98	-6,19	-28,50	-29,59	-20,90
	Média de 15N	-	-	13,80	14,65	7,45	7,42	9,65
	DesvPad de 13C	-	-	1,13	1,40	1,75	1,77	8,45
	DesvPad de 15N	-	-	0,60	2,24	3,29	3,31	3,98
<b>RV08</b>	Média de 13C	-	-	-28,89	-6,85	-28,26	-28,94	-14,03
	Média de 15N	-	-	12,98	10,50	10,07	8,46	9,88
	DesvPad de 13C	-	-	0,46	0,58	1,11	1,32	0,70
	DesvPad de 15N	-	-	1,48	0,18	2,66	0,65	2,25

Fonte: Do autor (2024).

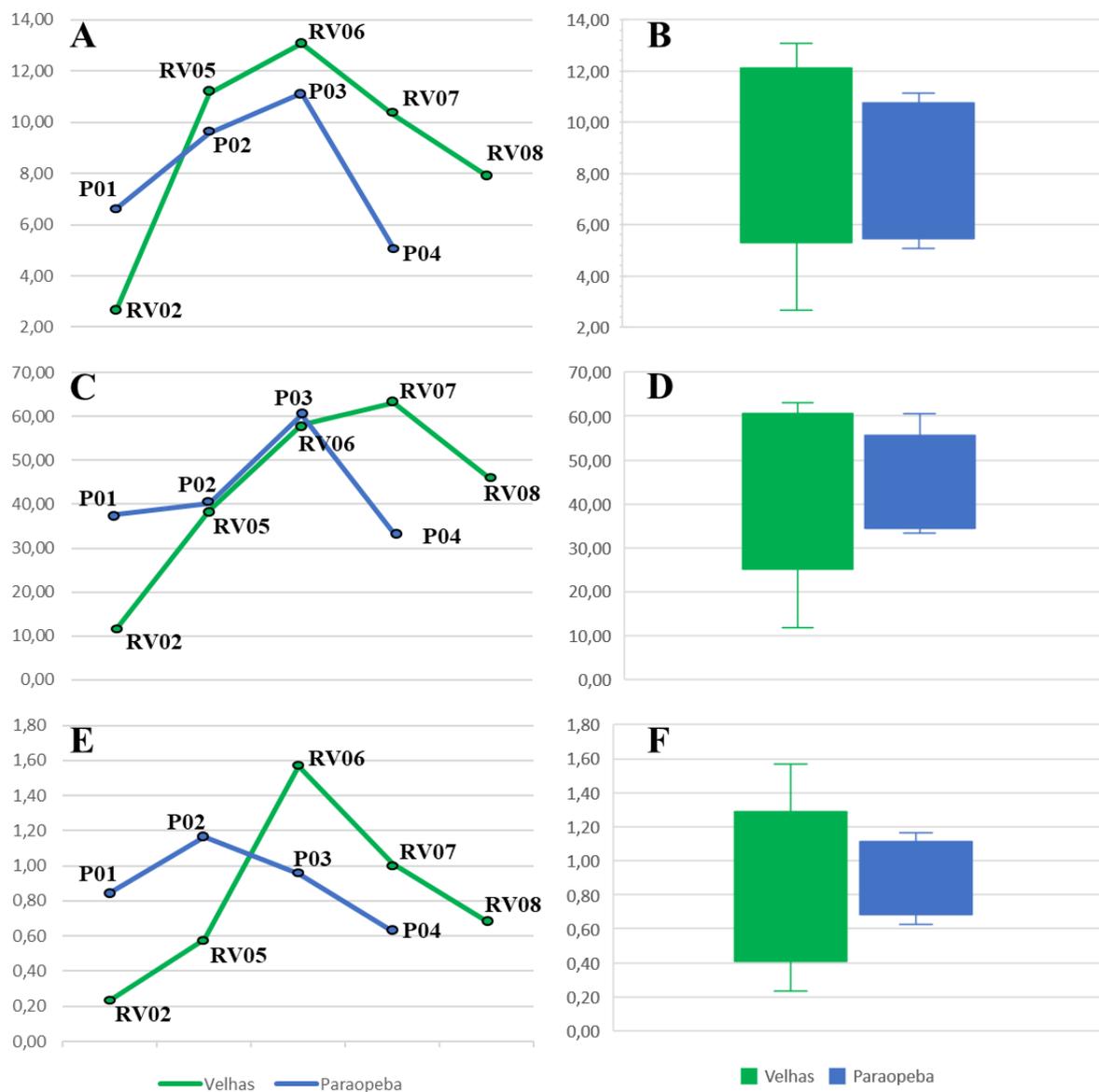
**Figura 11** - Biplots baseado na média dos valores isotópicos de carbono (eixo x) e nitrogênio (eixo y) de peixes e recursos basais dos pontos P03, P04, RV05, RV06, RV07, RV08.



Fonte: Do autor.

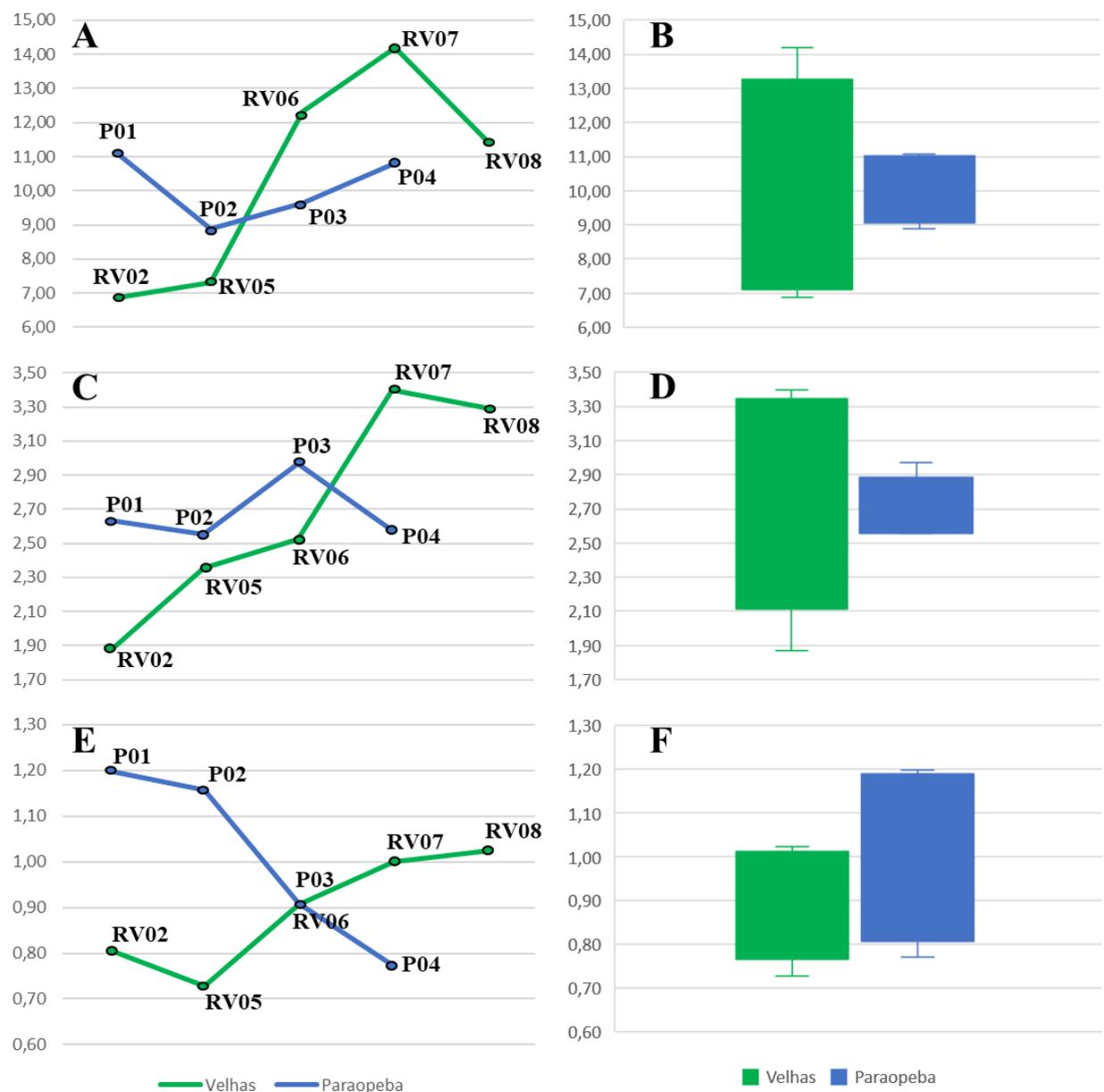
Para as métricas de Layman, não foram observadas diferenças significativas entre os rios das Velhas e Paraopeba, considerando-se apenas os grupos de pontos mais similares (Figuras 11 e 12). Para as métricas amplitude de nitrogênio (NR), área total (TA) e desvio padrão da distância do vizinho mais próximo (SDNND), os padrões de variação ao longo dos rios também foram similares. Nestes casos, para as três métricas, foi observado um aumento e posterior decréscimo nos seus valores ao longo dos dois rios (Figura 11). Porém, para as demais métricas, importantes diferenças foram observadas no padrão de mudança ao longo dos rios (Figura 12). A amplitude de carbono (CR), a distância média do centróide (CD) e a média do vizinho mais próximo (MNND) tendem a aumentar ao longo do rio das Velhas. Já no Paraopeba, estas métricas são mais estáveis ou possuem tendência de decréscimo (Figura 12).

**Figura 12 - A:** Variação da amplitude de nitrogênio (NR) nos pontos selecionados do Rio das Velhas em comparação aos pontos do Rio Paraopeba. **B:** - Boxplot da variação da amplitude de nitrogênio (NR) nos pontos selecionados do Rio das Velhas em comparação aos pontos do Rio Paraopeba. **C:** Variação da área total (TA) nos pontos selecionados do Rio das Velhas em comparação aos pontos do Rio Paraopeba. **D:** Boxplot da variação da área total (TA) nos pontos selecionados do Rio das Velhas em comparação aos pontos do Rio Paraopeba. **E:** Variação do desvio padrão da distância do vizinho mais próximo (SDNND) nos pontos selecionados do Rio das Velhas em comparação aos pontos do Rio Paraopeba. **F:** Boxplot do desvio padrão da distância do vizinho mais próximo (SDNND) nos pontos selecionados do Rio das Velhas em comparação aos pontos do Rio Paraopeba.



Fonte: Do autor.

**Figura 13** - A: Variação da amplitude de carbono (CR) nos pontos selecionados do Rio das Velhas (Azul) em comparação aos pontos do Rio Paraopeba (vermelho). B: Boxplot da variação da amplitude de carbono (CR) nos pontos selecionados do Rio das Velhas (V) em comparação aos pontos do Rio Paraopeba (P). C: Variação da distância média ao centroide (CD) nos pontos selecionados do Rio das Velhas (Azul) em comparação aos pontos do Rio Paraopeba (vermelho). D: Boxplot da variação da distância média ao centroide (CD) nos pontos selecionados do Rio das Velhas (V) em comparação aos pontos do Rio Paraopeba (P). E: Variação da média da distância do vizinho mais próximo (MNND) nos pontos selecionados do Rio das Velhas (Azul) em comparação aos pontos do Rio Paraopeba (vermelho). F: Boxplot da variação da média da distância do vizinho mais próximo (MNND) nos pontos selecionados do Rio das Velhas (V) em comparação aos pontos do Rio Paraopeba (P).



Fonte: Do autor.

## 5. DISCUSSÃO

Nossos resultados apontam para uma série de semelhanças entre os dois cursos d'água avaliados. As análises aqui apresentadas indicam que as regiões com histórico mais antigo de ocorrência de impactos antrópicos são as regiões mais degradadas devido à baixa variedade de guildas alimentares e suas características quanto ao enriquecimento de  $^{15}\text{N}$  e  $^{13}\text{C}$ , assim como é observado uma melhora gradual à medida que nos aproximamos do baixo curso de cada um dos rios. Entretanto, para o grau do impacto sobre a ictiofauna e a recuperação da qualidade ambiental à medida que nos afastamos do local impactado, as métricas de Layman indicam diferenças entre a calha principal dos dois rios, sendo o impacto imediato mais severo, porém com melhor recuperação no Rio das Velhas e menos severo, com recuperação mais lenta no Rio Paraopeba.

### 5.1. Abundância e riqueza de guildas tróficas

Os resultados apontam que no Rio Paraopeba temos maior dominância de espécies onívoras, que são conhecidas por sua plasticidade alimentar, sendo que sua dominância pode estar relacionada com um ambiente impactado, uma vez que tais espécies se adaptam melhor a condições não ótimas (ABELHA, 2001). O Rio Paraopeba já possuía, antes mesmo do contato com o rejeito, um histórico de degradação por diversos fatores, onde se destacam a contaminação orgânica e atividades minerárias e agropecuárias. (TRINDADE, 2013).

Com exceção do P01, os detritívoros são o segundo grupo mais dominante, estes que também podem ser favorecidos em locais degradados devido ao aumento de alimentos detritícos (com exceção dos que são caracterizados por adaptações morfológicas marcantes que podem restringir o uso de outros recursos) (LUZ-AGOSTINHO & KARLA, 2006). Ainda, observamos a ausência de invertívoros no ponto 02, o que juntamente com o favorecimento as espécies detritívoras, pode estar relacionada a proximidade deste ponto em relação ao local de depósito de rejeito. Diversas espécies de macroinvertebrados bentônicos possuem maior sensibilidade ambiental (PHIPPS, 1995; MACDONALD & DAVID, 1996) e, com a redução de habitats disponíveis para estas espécies, a oferta de alimento para peixes invertívoros pode ter diminuído, assim como a proporção desta guilda em relação às demais. A degradação ambiental na região também explicaria o aumento da proporção de onívoras, que como já dito, possuem maior plasticidade, ocupando nicho destas mais sensíveis.

Outra explicação para as diferentes proporções entre as guildas é a dificuldade em classificar os peixes em guildas tróficas uma vez que, principalmente em ambientes tropicais a plasticidade trófica é alta e mudanças ontogênicas na dieta podem ocorrer (PAISE, 2010). O mandi amarelo (*Pimelodus maculatus*), por exemplo, normalmente tem tendências invertívoras em ambientes lóticos, porém, quando se encontra em ambientes lênticos esse aumenta significativamente o consumo de peixes (ABELHA, 2001). Então uma espécie pode apresentar, em diferentes locais, diferentes hábitos alimentares, o que reforça mais uma vez a necessidade de estudos de linha de base para todas as bacias brasileiras, pois caso se tenha documentado os hábitos alimentares daquela comunidade ictia, em caso de um impacto ambiental é possível afirmar com clareza se estes hábitos mudaram.

Para o Rio das Velhas tivemos como destaque a grande diferença de composição do ponto RV01, o que é explicado pelo fato de ser um trecho do rio ainda de menor porte, considerado trecho de cabeceira. Nesse tipo de curso d'água, há no ambiente maior quantidade de mata ciliar e sombreamento sobre a superfície da água, o que é considerado um habitat ótimo para macroinvertebrados bentônicos (VANNOTE et al., 1980), o que explica a predominância de invertívoros no local. Por outro lado, por se encontrar na cabeceira temos pouco acúmulo de material particulado fino e ainda, devido à baixa incidência solar, não temos grande desenvolvimento de algas ou plantas aquáticas, o que explica a ausência de detritívoros e algívoros respectivamente. Nos pontos RV03 e RV04, onde temos a chegada de grande aporte de esgoto, ocorre a ausência de espécies piscívoras (predadores de topo) o que é um indicador que a integridade biótica do local está ruim, pois estas populações tendem a diminuir ou desaparecer à medida que a integridade ecológica diminui (KARR, 1981).

A principal diferença em proporção de guildas quando comparamos os dois rios são as espécies detritívoras que aparecem em maior escala no rio Paraopeba, principalmente nos pontos mais a jusante. Essa diferença pode também ocorrer por questões taxonômicas, uma vez que espécies da família Loricariidae são consideradas de difícil diferenciação e nos últimos anos tivemos descrições para as duas bacias (ZAWADZKI, 2017).

## **5.2. Similaridade entre a composição em espécies do Rio Paraopeba e Rio das Velhas**

A partir dos agrupamentos confirmados pela análise de Cluster, podemos perceber que o ponto RV01 realmente não se agrupa com os demais, o que é esperado uma vez que possui características completamente distintas por se tratar de uma área de cabeceira do Rio das

Velhas. Outra percepção é em relação aos pontos RV03 e RV04 que também formaram um grupo isolado mesmo apresentando uma vazão muito similar aos pontos P1 e P2. Dessa forma podemos entender que mesmo que o rompimento da barragem em brumadinho tenha gerado impacto a ictiofauna no ponto P02, o impacto pontual, mesmo que em maior gravidade, não é comparável com um impacto contínuo do lançamento de uma grande quantidade de esgotos na bacia do Rio das Velhas, demonstrando a gravidade do lançamento de grandes cargas de esgoto doméstico em um curso d'água. Assim, P1 e P2 agruparam-se com o ponto RV02 que possui menor vazão d'água, mas se encontra em elevação similar, além de possuírem menor aporte de carga de esgotos. Importante salientar que os três encontram-se ainda sob forte influência do quadrilátero ferrífero.

Entre os pontos do Paraopeba, o segundo agrupamento foi formado pelos pontos P03 e P04, juntamente com quatro pontos mais a jusante da região metropolitana de Belo Horizonte. A maior riqueza de peixes nestes pontos em relação ao primeiro agrupamento é algo esperado, uma vez que o quantitativo de espécies tende a aumentar juntamente com aumento da vazão do rio (PAVANELLI & CARAMASCHI, 2003; CASATTI, 2005.), mas indica também que os impactos podem estar sendo diluídos à medida em que se afasta da origem.

### **5.3. Estrutura trófica das comunidades de peixes do rio Paraopeba e Rio das Velhas**

A comparação visual das teias tróficas dos quatro pontos do Rio Paraopeba sugere que os principais recursos assimilados pela comunidade são os macroinvertebrados bentônicos, o que corrobora com a análise de guildas uma vez que as principais espécies presentes são onívoras e invertívoras. Já vegetação ripária (VR) e CPOM pouco contribuíram para as composições isotópicas de  $^{13}\text{C}$  e  $^{15}\text{N}$  das dos peixes, sendo que o mesmo ocorre para o Rio das Velhas.

Considerando a composição isotópica de  $^{15}\text{N}$  dos peixes, espécies classificadas como detritívoras ocuparam posições tróficas mais elevadas que os piscívoros em alguns pontos. Entre as possíveis explicações para esse resultado, pode-se se citar: 1) a assimilação de detritos enriquecidos em  $^{15}\text{N}$  por micróbios que colonizam CPOM; 2) variabilidade em  $\delta^{15}\text{N}$  entre as diferentes espécies vegetais que compõem o CPOM (embora esta variabilidade não tenha sido capturada no nosso esforço amostral, onde o CPOM foi diferente dos peixes tanto em  $\delta^{15}\text{N}$  quanto em  $\delta^{13}\text{C}$ ); 3) variação na composição do detrito, que é um recurso dinâmico e heterogêneo, incluindo diferentes tipos de tecidos vegetais e animais, micróbios mortos, bem

como produtos secretados, excretados ou exsudados de organismos (MOORE et al. 2004); e 4) assimilação de algum outro recurso, que apresente elevados valores de  $\delta^{15}\text{N}$  e que não foram amostrados no presente estudo, o que é passível de acontecer em bacias altamente antropizadas, com grande entrada de material alóctone. Entretanto, não podemos excluir a possibilidade de erro na classificação das guildas tróficas baseada em dados da literatura, uma vez que as espécies são frequentemente classificadas em diferentes guildas tróficas dependendo das características da região (MCCONNELL & LOWE-MCCONNELL, 1987). Indivíduos considerados detritívoros normalmente tem seu corpo modificado para o estilo alimentar de raspagem/sucção e se alimentam do material particulado presente sobre rochas ou no leito do rio, podendo assim incluir em sua dieta por exemplo, algas. Mesmo que esse recurso alimentar tenha classificação própria, algívoros (TEIXEIRA e GURGEL, 2004), não altera a classificação de detritívoros que é mais ampla, mas pode variar sua assinatura isotópica em relação aqueles que não consomem esse material e pertencem a mesma classificação de guildas, tornando os detritívoros o grupo com maior nicho.

A principal diferença observada entre os dois rios é a contribuição das algas para a comunidade, uma vez que para o Rio Paraopeba pouco do  $^{13}\text{C}$  observado em algas é similar aos peixes, e no Rio das Velhas estas se destacam como um dos principais contribuintes. A presença de algas contribuindo para a comunidade nessa proporção é uma característica normal para rios de médio porte, perdendo sua importância a medida que temos uma crescente na vazão (VENNOTE, 1980). A ausência da utilização desse recurso pela comunidade pode estar relacionada à sua quantidade ou qualidade, que não foram medidas neste estudo. Outra possibilidade é a diferença de turbidez entre os pontos de coleta dos dois Rios, uma vez que diminuindo a entrada de luz, temos uma redução na produção autóctone (VENNOTE, 1980) sendo necessário um estudo mais direcionado para entender o ocorrido.

Para as análises de posição trófica do Rio das Velhas, percebe-se um padrão tanto para a posição trófica da comunidade em geral, quanto para o número de indivíduos que ocupam cada uma das posições dentro do grupo. É possível notar que tanto o ponto mais a montante (RV01) quanto o ponto mais a jusante (RV08) possuem o mesmo formato piramidal e estão praticamente na mesma faixa de posição trófica, possuindo média de 4,79 e 3,99 respectivamente. O mesmo ocorre com os pontos RV02, RV06 que possuem formato mais alongado e estreito, ocupando de modo geral posições tróficas um pouco abaixo do grupo anterior (RV01 e RV08), com média de 3,23 e 3,10 respectivamente. Já os três pontos mais impactados por ações antrópicas RV03, RV04 e RV05 são aqueles que possuem menor média

de posição trófica (1,88; 2,69 e 2,12) e maior número de espécies com leitura próxima a média, formando uma espécie de losango, com o meio mais largo que extremidades. Esse padrão demonstra exatamente a queda nas posições tróficas com o aumento dos impactos antrópicos, assim como a recuperação gradual do rio a medida que se afasta deles. Tais padrões não foram observados no Rio Paraopeba, que apresentou queda entre o ponto P01 e P02, aumento do P02 para o P03, porém nova queda entre o P03 e P04, sendo necessárias mais coletas a montante e jusante dos pontos já coletados para identificar se temos melhor visualização de alguma tendência ao longo do curso d'água.

#### **5.4. Comparação entre diversidade trófica dos dois rios**

Para o Rio Paraopeba temos um impacto antrópico (introdução de rejeito no leito do rio) que, a princípio, causou grande mortalidade na ictiofauna de forma brusca durante a ocorrência em 2019 (IEF, 2019), mas que não extirpou a ictiofauna local. Já o impacto que vem ocorrendo no Rio das Velhas (lançamento de esgoto doméstico e industrial) é contínuo e inibe a retomada da ictiofauna de forma agressiva (ALVES & POMPEU, 2010.), permitindo no local apenas espécies registradas pela literatura como muito tolerantes, possuindo muitas das vezes mecanismos de respiração acessória ou outra adaptação que lhes possibilita viver em um ambiente com baixa concentração de oxigênio (JEPSEN, 2007).

Já as métricas de Layman permitiram evidenciar interessantes padrões. A amplitude de nitrogênio (NR) possui um valor maior em  $\delta^{15}\text{N}$  na parte intermediária dos rios, com tendência a queda nas jusantes, o que sugere níveis tróficos maiores nesta região. A área total (TA) e desvio padrão da distância do vizinho mais próximo (SDNND) nos dois rios, tendem a aumentar após a região impactada, e apresentam melhora posteriormente. A área total indica a variação dos extremos, e valores altos dessa métrica indicam que temos uma grande variação do enriquecimento das espécies no ponto, o que ocorre com locais impactados, uma vez que estes possuem recursos atípicos e espécies mais generalistas. Já um valor baixo de SDNND sugere uma distribuição mais uniforme dos nichos tróficos, o que corrobora com a análise de posição trófica, que indica os pontos intermediários do Rio das Velhas mais impactados são também menos uniformes, e para o Rio Paraopeba essa métrica indica a mesma tendência em menor proporção.

Já para as métricas ligadas à amplitude de recursos utilizados (CR) temos uma grande melhora no Rio das Velhas ao longo do gradiente, enquanto para o Paraopeba temos a queda após o local impactado, e uma recuperação mais lenta dos valores. Um grande CR sugeriria um ecossistema com múltiplas fontes de produção primária e  $\delta$  variando  $^{13}\text{C}$  na base da cadeia alimentar e isso abre espaço para a diversificação de nichos. Para métricas ligadas a densidade de espécies da comunidade (CD e MNND), temos uma melhora contínua para os pontos do Rio das Velhas, que demonstram que após o impacto temos uma melhoria no grau médio de diversidade trófica dentro da cadeia alimentar além de uma baixa redundância trófica, ou seja, uma estrutura alimentar com poucas espécies ocupando nichos semelhantes. Para o Rio Paraopeba os valores médios de diversidade variam pouco, assim como a redundância aumenta, o que não indica melhora na comunidade ao longo do curso d'água.

Essas métricas demonstram situações distintas entre os dois rios. No Rio das Velhas, temos uma melhoria a partir dos pontos RV06/07 que pode ser explicada pelo grande aumento de vazão, oriundo principalmente dos afluentes Rios Paraúna/Cipó, Rio Pardo e Rio Curimataí, que possuem uma qualidade da água superior à apresentada pelo Rio das Velhas (GALDEAN, 2000). Já o Rio Paraopeba não apresenta nenhum afluente considerado de grande porte após o local do depósito de rejeito. Além disso, um de seus pequenos afluentes é o Rio Betim, que transporta uma grande carga de esgoto oriunda do município de Betim, uma cidade industrial da região metropolitana de Belo Horizonte (GUIMARAES, 2009).

### **3. CONCLUSÃO**

Concluimos que os dois principais rios que compõem as bacias hidrográficas da região metropolitana de Belo Horizonte possuem alto grau de similaridade e, mesmo possuindo distintos históricos de degradação relacionados à atividade minerária e esgoto doméstico/industrial, é possível comparar suas comunidades íctias.

A partir desta constatação, e a comparação dos dois rios, é possível afirmar que, quase três anos após do rompimento da barragem em Brumadinho, o rio Paraopeba já apresenta fauna de peixes e atributos tróficos comparáveis à algumas regiões com nível intermediário de degradação do rio das Velhas. Neste último, porém, a recuperação da comunidade após o recebimento dos esgotos de Belo Horizonte se dá de maneira mais evidente que o rio Paraopeba a jusante da região do rompimento. Devem contribuir para isso a maior extensão e presença de afluentes bem preservados no rio das Velhas.

O acompanhamento das comunidades de peixes das duas bacias, em especial de suas respostas ao tratamento de esgotos no Velhas e ações de reparação no Paraopeba, forneceria respostas importantes para o entendimento da resiliência de rios tropicais frente a impactos de grande magnitude. A realização dos estudos de monitoramento é de extrema importância para o conhecimento científico de como ocorre a recuperação da comunidade íctia, quais as ações mais eficazes e quanto tempo é necessário para que cada mudança ocorra perante diferentes fatores de impacto.

## REFERÊNCIAS

- ABELHA, Milza Celi Fedatto; AGOSTINHO, Angelo Antonio; GOULART, Erivelto. **Plasticidade trófica em peixes de água doce**. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v. 23, p. 425-434, 2001.
- ALONSO, M. B., DE CARVALHO, D. R., ALVES, C. B. M., & POMPEU, P. S. **Trophic structure of a fish assemblage in a reference condition river located in a polluted watershed**. *Environmental Biology of Fishes*, 103(11), 1437-1452, 2020.
- ALVES, C. B. M. **A ictiofauna ea escada experimental para peixes do rio Paraopeba-UTE Igarapé, bacia do rio São Francisco (Minas Gerais)**. *Transposição de Peixes. Belo Horizonte, Cemig*, 173p, 59-81, 2012.
- ALVES, C. B. M., & LEAL, C. G. **Aspectos da conservação da fauna de peixes da bacia do rio São Francisco em Minas Gerais**. *MG. Biota*, 2(6), 26-50, 2010.
- ALVES, C. B. M., & Pompeu, P. S. **Historical changes in the Rio das Velhas fish fauna-Brazil**. In *American Fisheries Society Symposium* (Vol. 45, No. 1, pp. 587-602, 2005).
- ALVES, C. B. M. & POMPEU, S. P. **Peixes do Rio das Velhas: passado e presente (pp. 167-189)**. Belo Horizonte, MG: Argvmentvm, 2010.
- ALVES, C. B. M.; VONO, V. **A ictiofauna do rio Paraopeba, bacia do rio São Francisco, anterior a construção da escada experimental para peixes**. *Anais do Seminário Regional de Ecologia*, v. 8, p. 1523-1537, 1998.
- ANDRADES, R. GUABIROBA, H. C. Hora, M. S. et al. **Early evidences of niche shifts in estuarine fishes following one of the world's largest mining dam disasters**. *Marine pollution bulletin*, v. 154, p. 111073, 2020.
- ANDRADES, R. MARTINS, R.F., GUSBIROBA, H. C. et al. **Effects of seasonal contaminant remobilization on the community trophic dynamics in a Brazilian tropical estuary**. *Science of The Total Environment*, v. 801, p. 149670, 2021.
- ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DE MINAS GERAIS (13 de junho de 2013). «**LEI COMPLEMENTAR nº 89, de 12/01/2006**». ALMG. Consultado em 28 de dezembro de 2023.
- BARBOSA, J. M., SOARES, E. C., CINTRA, I. H. A. et al. **Perfil da ictiofauna da bacia do rio São Francisco**. *Acta of Fisheries and Aquatic resources*, v. 5, n. 1, p. 70-90, 2017.
- BARRIE, A. & PROSSER, S. J. **Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry**. *Mass spectrometry of soils*. New York: Marcel Dekker, p. 1-46, 1996.
- BOUTTON, Thomas W. **Stable carbon isotope ratios of natural materials: 2. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments**. In: *Carbon isotope techniques*. 1991.

- BRITISKI, H. A.; SATO, Y.; ROSA, A. B. S. **Manual de identificação de peixes da região de Três Marias (com chaves de identificação para os peixes da Bacia do São Francisco)** [taxonomia animal, peixe de água doce, Brasil]. 1984.
- CASATTI, Lilian. **Fish assemblage structure in a first order stream, southeastern Brazil: longitudinal distribution, seasonality, and microhabitat diversity.** *Biota Neotropica*, v. 5, p. 75-83, 2005.
- CBHSF, comitê da bacia do São Francisco. **Comitê da bacia hidrográfica do rio Paraopeba sf3 minas gerais.** <https://cbhsaofrancisco.org.br/comites-de-afluentes/cbh-do-rio-paraopeba-sf3-minas-gerais/>. Acessado em 15/09/2021.
- CETEC, Centro Tecnológico de Minas Gerais. Diagnóstico ambiental do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: **Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC.** Série de Publicações Técnicas/SPT010, 1983.
- COSTA, C. M. R., HERMANN, G., Martins, C. S., Lins, L. V., & Lamas, I. R. **Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação,** 1998.
- DE CARVALHO, D. R., DE CASTRO, D. M. P., CALLISTO, M., MOREIRA, M. Z., & POMPEU, P. S. **The trophic structure of fish communities from streams in the Brazilian Cerrado under different land uses: an approach using stable isotopes.** *Hydrobiologia*, 795(1), 199-217, 2017.
- DE CARVALHO, DÉBORA REIS; ALVES, Carlos Bernardo Mascarenhas; MOREIRA, MARCELO ZACHARIAS; POMPEU, PAULO SANTOS. **Trophic diversity and carbon sources supporting fish communities along a pollution gradient in a tropical river.** *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, v. 738, p. 139878, 2020.
- DE CARVALHO, D. R., ALVES, C. B. M., FLECKER, A. S., SPARKS, J. P., MOREIRA, M. Z., & Pompeu, P. S. **Using  $\delta^{15}\text{N}$  of periphyton and fish to evaluate spatial and seasonal variation of anthropogenic nitrogen inputs in a polluted Brazilian river basin.** *Ecological Indicators*, 115, 106372, 2020.
- DE CARVALHO, D. R., SPARKS, J. P., FLECKER, A. S. et al. **Nitrogen pollution promotes changes in the niche space of fish communities.** *Oecologia*, v. 197, p. 485-500, 2021.
- EHLERINGER, J. R., & MONSON, R. K. **Evolutionary and ecological aspects of photosynthetic pathway variation.** *Annual Review of Ecology and Systematics*, 24(1), 411-439, 1993.
- FRANÇA, L. E. **Barragens de rejeito não-seguras da Bacia do Paraopeba, Minas Gerais: risco para recursos hídricos e ictiofauna.** Programa de Pós Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais – UFMG, 2019.
- FUNDAJ - **Fundação Joaquim Nabuco** - <https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/revitalizacao-de-bacias/aos-poucos-a-lama-vai-matando-o-rio-paraopeba>. Acessado em 01/01/2024.

GALDEAN, N.; CALLISTO, M.; BARBOSA, F. A. R. **Lotic ecosystems of Serra do Cipó, southeast Brazil: water quality and a tentative classification based on the benthic macroinvertebrate community.** *Aquatic Ecosystem Health & Management*, v. 3, n. 4, p. 545-552, 2000.

GARAVELLO, J. C., & GARAVELLO, J. P. **Spatial distribution and interaction of four species of the catfish genus *Hypostomus* Lacépède with bottom of Rio São Francisco, Canindé do São Francisco, Sergipe, Brazil (Pisces, Loricariidae, Hypostominae).** *Brazilian Journal of Biology*, 64, 103-141, 2004.

GUIMARAES, Lenice Neves. **Desafios e perspectivas de integração das políticas de recursos hídricos e meio ambiente na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba Alto São Francisco.** 2009.

IBAMA/IEF. **Nota Técnica nº 5/2019/NUBIO-MG/DITEC-MG/SUPES-MG.** Disponível em: <[http://www.ibama.gov.br/phocadownload/notas/2019/SEI\\_IBAMA-4666823-NotaTecnica-Ibama-IEF.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/notas/2019/SEI_IBAMA-4666823-NotaTecnica-Ibama-IEF.pdf)> Acessado em: 28/12/2023

IEF, 2019, 25 jan. **Nota de Esclarecimento - Desastre Barragem B1** Disponível em:<<http://www.ief.mg.gov.br/noticias/1/2576-nota-de-esclarecimento-brumadinho>> Acessado em: 28/12/2023.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das águas. **Monitoramento de Qualidade das águas.** <https://portalinfohidro.igam.mg.gov.br>. Acessado em dezembro de 2023.

IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (SF3)** <https://www.minasgerais.com.br/pt/atracoes/pequi/rio-paraopeba>. Acessado em março de 2023.

JACKSON, A. L., INGER, R., PARNELL, A. C., & BEARHOP, S. **Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER—Stable Isotope Bayesian Ellipses in R.** *Journal of Animal Ecology*, 80(3), 595-602, 2011.

JEPSEN, David B.; WINEMILLER, Kirk O. **Basin geochemistry and isotopic ratios of fishes and basal production sources in four neotropical rivers.** *Ecology of Freshwater Fish*, v. 16, n. 3, p. 267-281, 2007.

KARR, James R. **Assessment of biotic integrity using fish communities.** *Fisheries*, v. 6, n. 6, p. 21-27, 1981.

LAKE, J. L., MCKINNEY, R. A., OSTERMAN, F. A. et al. **Stable nitrogen isotopes as indicators of anthropogenic activities in small freshwater systems.** *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 58, n. 5, p. 870-878, 2001.

LASCHEFSKI, Klemens Augustinus. **Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): Desastres como meio de acumulação por despossessão.** 2020.

LAYMAN, C. A., ARRINGTON, D. A., MONTAÑA, C. G., & POST, D. M. **Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure?.** *Ecology*, 88(1), 42-48, 2007.

- LISBOA, Apolo Heringer; GOULART, Eugênio Marcos Andrade; DINIZ, Letícia Fernandes Malloy. **Projeto Manuelzão. Revitalização da região da sub-bacia do rio das Velhas.** Belo Horizonte: Internato Rural do DMPS/FMUFG, 1997.
- LUJAN, N. K., WINEMILLER, K. O., & ARMBRUSTER, J. W. **Trophic diversity in the evolution and community assembly of loricariid catfishes.** *BMC Evolutionary Biology*, 12(1), 1-13, 2012.
- LÜTKEN, C. F. **Velhas-flodens fiske: Et bidrag til Brasiliens ichthyologi (Vol. 12).** Bianco Lunos bogtrykkeri, 1875.
- LUZ-AGOSTINHO, K. D., BINI, L. M., FUGI, R. et al. **Food spectrum and trophic structure of the ichthyofauna of Corumbá reservoir, Paraná river Basin, Brazil.** *Neotropical Ichthyology*, v. 4, p. 61-68, 2006.
- MCCONNELL, R.; LOWE-MCCONNELL, R. H. **Ecological studies in tropical fish communities.** Cambridge University Press, 1987.
- MCCUTCHAN JR, J. H., LEWIS JR, W. M., KENDALL, C., & MCGRATH, C. C. **Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur.** *Oikos*, 102(2), 378-390, 2003.
- MACDONALD, D. S., LITTLE, M., ENO, N. C. et al. **Disturbance of benthic species by fishing activities: a sensitivity index.** *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 6, n. 4, p. 257-268, 1996.
- MIIL, A. C., PINNEGAR, J. K., & POLUNIN, N. V. C. **Explaining isotope trophic-step fractionation: why herbivorous fish are different.** *Functional Ecology*, 21(6), 1137-1145, 2007.
- MOORE, J. W., & SEMMENS, B. X. **Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models.** *Ecology letters*, 11(5), 470-480, 2008.
- MOORE, JC, BERLOW EL, COLEMAN DC et al. **Detritus, trophic dynamics and biodiversity.** *Ecol Lett* 7:584–600, 2004.
- NOVOA, R., & LOOMIS, R. S. **Nitrogen and plant production.** *Plant and soil*, 58(1), 177-204, 1981.
- PAISE, Gabriela. **Efeitos da fragmentação de habitat sobre a comunidade de pequenos mamíferos de Mata Atlântica no Estado de São Paulo.** Tese de Doutorado. 2010.
- PAVANELLI, Carla Simone; CARAMASCHI, Érica Pellegrini. **Temporal and spatial distribution of the ichthyofauna in two streams of the upper Rio Paraná Basin.** *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 46, p. 271-280, 2003.
- PARNELL, A. C., INGER, R., BEARHOP, S., & JACKSON, A. L. **Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation.** *PloS one*, 5(3), e9672, 2010.

PHIPPS, G. L.; MATTSON, V. R.; ANKLEY, G. T. **Relative sensitivity of three freshwater benthic macroinvertebrates to ten contaminants.** Archives of Environmental Contamination and Toxicology, v. 28, p. 281-286, 1995.

POST, David M. **Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions.** Ecology, v. 83, n. 3, p. 703-718, 2002.

REID, A. J., CARLSON A. K., CREED, I. F. et al. **Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity.** Biological Reviews, v. 94, n. 3, p. 849-873, 2019.

REGAN, C. T. III. **A Monograph of the Fishes of the Family Loricariidæ.** *The Transactions of the Zoological Society of London*, 17(3), 191-350, 1904.

SÁNCHEZ, L. E., ALGER, K., ALONSO, L. et al. **Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão. O caminho para uma mitigação sustentável e resiliente.** Relatório Temático, n. 1º, 2018.

STOCK, B.; SEMMENS, B. **MixSIAR GUI User Manual.** Version 3.1 1–59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.47719>. 2016.

TRINDADE, Ana Laura Cerqueira. **Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de dados de monitoramento de qualidade das águas superficiais da porção mineira do rio São Francisco.** 2013.

TURAK, E., HARRISON, I., DUDGEON, D. et al. **Essential Biodiversity Variables for measuring change in global freshwater biodiversity.** Biological Conservation, v. 213, p. 272-279, 2017.

VAL, A. L., & DE ALMEIDA-VAL, V. M. **Fishes of the Amazon and their environment: physiological and biochemical aspects** (Vol. 32). Springer Science & Business Media, 2012.

VANDER ZANDEN, M. Jake; CABANA, Gilbert; RASMUSSEN, Joseph B. **Comparing trophic position of freshwater fish calculated using stable nitrogen isotope ratios ( $\delta^{15}\text{N}$ ) and literature dietary data.** Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 54, n. 5, p. 1142-1158, 1997.

VANNOTE, R. L., MINSHALL, G. W., CUMMINS, K. W. et al. **The river continuum concept.** Canadian journal of fisheries and aquatic sciences, v. 37, n. 1, p. 130-137, 1980.

VIEIRA, FABIO & GOMES, JOÃO & MAIA, BRUNO & SILVA, LUIZ. **Peixes do Quadrilátero Ferrífero - Guia de identificação,** 2015.

WINEMILLER, K. O., HOEINGHAUS, D. J., PEASE, A. A. et al. **Stable isotope analysis reveals food web structure and watershed impacts along the fluvial gradient of a Mesoamerican coastal river.** River Research and Applications, v. 27, n. 6, p. 791-803, 2011.

ZAWADZKI, Claudio H.; OYAKAWA, Osvaldo T.; BRITSKI, Heraldo A. **Hypostomus velhochico, a new keeled Hypostomus Lacépède, 1803 (Siluriformes: Loricariidae) from the rio São Francisco basin in Brazil.** Zootaxa, v. 4344, n. 3, p. 560-572, 2017.