

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da
Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região
Marinha e Costeira Adjacente**

RELATÓRIO ANUAL:

Anexo 3 Dulcícola - Zooplâncton

RT-18H RRDM/NOV19

Coordenação Geral

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Novembro de 2019

COORDENAÇÕES

Anexo 1

Adalto Bianchini (FURG)

Anexo 3

Edmilson Costa Teixeira (UFES)

Fabian Sá (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Björn Gücker (UFSJ)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Amado Filho (IPJB) *in memoriam*

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

Iola Gonçalves Boechat (UFSJ)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Leonardo Tavares Salgado (IPJB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Rodrigo Leão de Moura (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

Anexo 4

Jacqueline Albino (UFES)

Subprojetos

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

Anexo 5

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

Anexo 6

Agnaldo Silva Martins (UFES)

Subprojetos

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

Anexo 7

Maurício Hostim (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Carlos W. Hackradt (UFSB)

Fabiana Felix Hackradt (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Luis Fernando Duboc (UFV)

Anexo 8

Heitor Evangelista (UERJ)

Coordenação Técnica (CTEC)

Alex Cardoso Bastos

Lara Gabriela Magioni Santos

Laura Silveira Vieira Salles

Tarcila Franco Menandro

Coordenação Escritório de Projetos

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Patrícia Bourguignon Soares

Paulo Roberto Filgueiras

Valdemar Lacerda Junior

Walter Luiz Alda Junior

Coordenação Núcleo de Atuação Integrada em Rede (NAIR)

Edmilson Costa Teixeira

Karla Libardi Gallina

Andressa Christiane Pereira

Anna Paula Lage Ribeiro

Caroline De Marchi Pignaton

Paulo Eduardo Marques

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	METODOLOGIA	6
2.1	AMOSTRAGEM EM CAMPO	6
2.2	ANÁLISES EM LABORATÓRIO.....	7
3	RESULTADOS	8
3.1	ZOOPLÂNCTON TAXONOMIA.....	8
3.2	DENSIDADE.....	12
3.3	RIQUEZA (S).....	15
3.4	BIOMASSA.....	18
3.5	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	22
4	REFERÊNCIAS	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Densidade zooplanctônica (Ind. L ⁻¹) entre os ambientes dulcícolas estudados no PMBA. ...	12
Figura 2: Abundância relativa por grupo e estação. Estações: 17 Rio Guandu; 0 Jusante; 18 Lago Limão; 19 Lago Nova; 20 Lago Juparanã; 21 Rio Doce; 22 Rio Doce; 23 Lagoa Areão; 24 Lagoa Areal; 25 e 25A Monsarás e 23 Foz do Rio Doce.....	13
Figura 3: Análise de correlação (Spearman) entre os dados de densidade do zooplâncton (ind.L ⁻¹) e os metais: Al, Fe, Cr e V. Dados obtidos no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.	14
Figura 4: Diagrama ilustrativo mostrando a relação negativa da densidade de zooplâncton com a concentração de Al, Fe, Cr e V.	14
Figura 5: Riqueza do zooplâncton nos ambientes estudados no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.....	15
Figura 6: Análise de correlação (Spearman) entre os dados de riqueza e diversidade (Shannon) do zooplâncton (ind.L ⁻¹) e os metais: Al, Fe e V. Dados obtidos no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.....	16
Figura 7: Diagrama ilustrativo mostrando a relação da riqueza de Zooplâncton com a concentração de Al, Fe e V.....	16
Figura 8: Riqueza e diversidade beta das regiões do médio e baixo Rio Doce.	18
Figura 9: Variação da biomassa zooplanctônica (µg.L ⁻¹) nos ecossistemas estudados no âmbito da RRDM.	18
Figura 10: Biomassa (µg.Peso Seco. L ⁻¹) dos grandes grupos do zooplâncton (Rotifera, Cladocera e Copepoda) nos ambientes estudados durante o período de outubro de 2018 a julho de 2019 no contexto do projeto da RRDM.....	19
Figura 11: Análise de correlação (Spearman) entre a razão da biomassa zooplâncton:fitoplâncton (ug.L ⁻¹) e os metal Al. Dados obtidos no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.	20
Figura 12: Diagrama ilustrativo mostrando a razão da biomassa zoo/fitoplâncton com a concentração de Al.	20
Figura 13: Aspecto geral dos copépodos Calanoida registrados nas amostras do PMBA do Rio Doce, com epibiontes superficiais aderidos.....	21
Figura 14: Análise de correspondência canônica com base nos dados de copépodes parasitados e variáveis limnológicas. Dados obtidos no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição e distribuição espacial do zooplâncton nos ambientes estudados no contexto do projeto da RRDM - outubro de 2018 a agosto de 2019.....	9
Tabela 2: Valor individual de indicação (IndVal) do zooplâncton encontrado nos ambientes estudadas no contexto do projeto da RRDM durante o período de outubro de 2018 a agosto de 2019.	12
Tabela 3: Resultados da análise de Permanova da riqueza zooplanctônica entre diferentes trechos da bacia do Rio Doce (ES e MG).	17

ANEXO 3 DULCÍCOLA– ZOOPLÂCTON

1 INTRODUÇÃO

A comunidade zooplanctônica pode ser considerada como um compartimento estratégico na dissipação energética dos ecossistemas aquáticos e na manutenção e orientação das teias tróficas aquáticas. O seu posicionamento na cadeia alimentar, com um alto grau de conexão com os produtores primários, o torna extremamente suscetível às mudanças estruturais ocorridas neste nível trófico. Em função dos ciclos vitais rápidos, as alterações ocorridas na matriz aquática são rapidamente espelhadas pelo zooplâncton, que passa a sinalizar a intensidade e as condições estabelecidas durante e após a consolidação destas perturbações. Além disso, o zooplâncton também apresenta forte vinculação com os níveis tróficos mais elevados da teia aquática (Soranno et al., 1985), sendo responsável por uma importante rota de transferência de energia.

Todas essas características tornam as comunidades zooplanctônicas elementos-chave para o entendimento das modificações ocorridas em ecossistemas aquáticos, particularmente na derivação de modelos eficazes no entendimento do grau de propagação dessas perturbações ao longo das cadeias alimentares aquáticas e das implicações resultantes da presença de componentes tóxicos e seus efeitos sobre os demais elos da cadeia alimentar aquática (Bays & Chrisman, 1983; Jeppesen et al., 2000; Primo et al., 2015).

Alguns aspectos universais da comunidade zooplanctônica têm sido considerados como preditores de impactos ambientais: composição, distribuição quantitativa das espécies, riqueza, diversidade, tamanho e biomassa (Bjerring & Amsinck, 2011). Desta forma, o principal objetivo deste projeto de pesquisa foi descrever a composição e estrutura zooplâncton (densidade, biomassa, riqueza e diversidade) na área do Baixo Rio Doce, onde se observa atualmente a intrusão de material minerário decorrente do rompimento da barragem de Fundão.

No presente relatório são apresentados os resultados obtidos na análise das amostras de zooplâncton dulcícola no período de Outubro/2018 a Outubro/2019.

2 METODOLOGIA

2.1 AMOSTRAGEM EM CAMPO

Os ambientes amostrais foram selecionados de acordo com o percurso realizado pelo rejeito carregado pela água, no leito do Baixo Rio Doce. As amostragens foram realizadas de Outubro/2018 a Outubro/2019, no período diurno. As amostras do zooplâncton foram coletadas com rede de plâncton

de 65 µm de abertura de malha, equipada com fluxômetro para estimativa do volume de água filtrada. As amostras foram preservadas em formol neutralizado a 4%.

2.2 ANÁLISES EM LABORATÓRIO

Para análise quantitativa do zooplâncton, toda a amostra foi examinada. A contagem de pequenas frações foi realizada por subamostragem, a partir da retirada de sub-amostras do contendo 1mL cada, para analisar e estimar a abundância e a riqueza dos organismos. As subamostras foram retiradas com pipeta não seletiva de Hensel-Stempel. O número total de subamostras foi determinado a partir do cálculo do coeficiente de variação entre as contagens, adotado como inferior a 20%.

O zooplâncton foi contado em câmara de Sedgwick-Rafter em estereomicroscópio Olympus CX31, com câmara fotográfica acoplada – Olympus SC30. Os indivíduos triados foram preservados em formol a 4% e mantidos no Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal de Ouro Preto.

Os indivíduos foram identificados seguindo as descrições de Elmoor-Loureiro (1997); Santos-Wisniewski et al. (2002); Sterza & Fernandes (2006). Foram feitas fotografias e dissecação de exemplares para distinguir os detalhes das estruturas e das características indispensáveis para a identificação dos grupos de Cladocera, Copepoda e Rotifera.

Foram obtidas a abundância (Ind.L-1), riqueza e diversidade, o tamanho corporal, bem como a proporção de fêmeas ovadas e número de embriões (estimativa de recrutamento).

A riqueza foi mensurada através da contagem do número de espécies (S) em uma amostra, sendo diretamente dependente do tamanho amostral, isto é, quanto maior a amostra, maior a quantidade de espécies que podem ser computadas.

A diversidade foi expressa através da função entre o número de espécies e a equitabilidade dos valores de importância da mesma. Para tanto, será utilizado o índice de Shannon – Wiener (1949), o qual utiliza dos valores de riqueza e equitabilidade.

$$H' = - \sum p_i (\log p_i)$$

Em que: p_i é o valor importância e \log será calculado na base 2, ou 10 ou neperiano. A diversidade H' é adimensional.

A biomassa zooplancônica foi obtida com base no método alométrico, que consiste no uso de equações exponenciais, as quais relacionam dimensões lineares dos organismos e seu peso seco, por meio de regressões entre o comprimento do animal (µm) vs. o seu peso individual. As fórmulas a serem utilizadas são:

$$B = a.L^b$$

e

$$\ln B = c + b.\ln L$$

Onde $c = \ln a$ e “a” e “b” são coeficientes específicos para cada espécie, os quais serão encontrados na literatura de Bicudo & Bicudo (2007), que reúne alguns desses coeficientes para organismos zooplancônicos regularmente encontrados em ambientes lacustres.

O parâmetro a (ou c) está relacionado à interseção no eixo das ordenadas e o parâmetro b, à inclinação da reta de regressão entre as variáveis dependente ($B = \text{eixo } y$) e independente ($L = \text{eixo } x$).

Para quantificar o “valor de bioindicação” das espécies zooplancônicas foi utilizada a análise de Valor Indicador Individual (IndVal) (Dufrene & Legendre, 1997), com o objetivo de detectar quais espécies poderiam apresentar características que evidenciam “fidelidade” aos ambientes estudados. Posteriormente, foram realizadas análises de correlação (Spearman) para verificar se as variações observadas na densidade, riqueza e diversidade (Shannon) do zooplâncton bem como as razões de biomassa de zooplâncton: fitoplâncton estão associadas com a concentração de metais na água.

A fim de realizar uma análise complementar utilizando dados das comunidades zooplancônicas do médio (não atingido pelo desastre da Samarco) e baixo Rio Doce (ambientes amostrados no contexto da RRDM), a riqueza e a partição da diversidade beta do zooplâncton foram comparadas entre o médio e baixo Rio Doce com o teste de Mann Whitney e analisando a contribuição do aninhamento e *turnover* (grau de similaridade e diferenciação de ocorrência espécies entre pontos amostrais, respectivamente) das comunidades estudadas para cada região do Rio Doce. Também foi realizada uma análise de Permanova, utilizando os dados de riqueza do zooplâncton, para comparar a estrutura das comunidades do médio e baixo Rio Doce.

Adicionalmente, foi realizada uma análise de correspondência canônica para verificar se os níveis de infestação de epibiontes nos copépodes *Notodiaptomus conifer*, *N. iheringi* e *N. isabellae* apresentavam relação com variáveis limnológicas. Todas as análises foram realizadas no programa R utilizando os pacotes labdsv, vegan, ggpubr e betapart, com um nível de significância de 0.05.

3 RESULTADOS

3.1 ZOOPLÂNCTON TAXONOMIA

A comunidade zooplancônica da porção do Baixo Rio Doce foi composta por 99 (noventa e nove) táxons, representados por 53 táxons de Rotifera, 28 de Cladocera e 18 de Copepoda (Tabela 1).

Tabela 1: Composição e distribuição espacial do zooplâncton nos ambientes estudados no contexto do projeto da RRDM - outubro de 2018 a agosto de 2019.

Espécies	Rio tributário	Rio Doce					Lagos				Lagoas		
	E17	E0	E21	E22	E26	E18	E19	E20	E23	E24	E25	E25A	
Rotifera													
<i>Ascomorpha</i> sp.		X											
<i>Bdelloida</i>	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	
<i>Brachionus calyciflorus</i>	X		X	X	X			X					
<i>Brachionus caudatus</i>								X					
<i>Brachionus falcatulus</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>Brachionus dolabratus</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>Brachionus leydigi</i>		X		X									
<i>Brachionus mirus</i>							X	X		X		X	
<i>Brachionus quadridentatus</i>				X									
<i>Cephalodella gibba</i>					X			X					
<i>Conochilus dossuarius</i>			X	X		X	X	X			X	X	
<i>Conochilus unicornis</i>				X		X	X	X		X	X	X	
<i>Euchlanis dilatata luksiana</i>					X				X		X	X	
<i>Euchlanis dilatata dilatata</i>		X	X		X	X		X	X				
<i>Euchlanis lyra</i>										X	X		
<i>Filinia longiseta</i>			X		X	X	X	X				X	
<i>Filinia terminalis</i>	X		X			X	X	X			X	X	
<i>Hexarthra intermedia</i>								X					
<i>Hexarthra mira</i>						X		X			X	X	
<i>Hexarthra oxyuris</i>				X							X		
<i>Keratella americana</i>		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	
<i>Keratella cochlearis</i>						X							
<i>Keratella tropica</i>	X		X	X		X	X	X	X		X	X	
<i>Lecane bulla</i>	X	X	X	X	X	X				X	X	X	
<i>Lecane clara</i>				X									
<i>Lecane closterocerca</i>				X									
<i>Lecane cornuta</i>			X	X				X	X		X		
<i>Lecane elongata</i>									X				
<i>Lecane hornemanni</i>											X		
<i>Lecane imbricata</i>											X		
<i>Lecane leontina</i>	X		X	X	X	X			X	X	X	X	
<i>Lecane lunaris</i>	X		X	X	X						X		
<i>Lecane papuana</i>	X	X	X	X			X	X	X	X		X	
<i>Lecane proiecta</i>					X			X					
<i>Lecane scutata</i>								X				X	
<i>Lecane stichaea</i>										X	X		
<i>Lecane unguitata</i>				X	X							X	
<i>Lepadella patella</i>					X								

Espécies	Rio tributário	Rio Doce					Lagos				Lagoas		
	E17	E0	E21	E22	E26	E18	E19	E20	E23	E24	E25	E25A	
<i>Macrochaetus longipes</i>												x	
<i>Platyias leloupi</i>				x									
<i>Platyias quadricornis</i>	x	x	x	x	x	x			x		x	x	
<i>Polyarthra vulgaris</i>												x	
<i>Pompholyx triloba</i>								x				x	
<i>Synchaeta jollyae</i>		x											
<i>Testudinella patina</i>		x							x		x	x	
<i>Trichocerca bicristata</i>								x					
<i>Trichocerca elongata</i>										x			
<i>Trichocerca similis</i>						x	x	x	x				
<i>Trichotria tetractis</i>				x					x		x	x	
Cladocera													
<i>Alona guttata</i>	x	x			x		x		x				
<i>Antholona verrucosa</i>		x							x				
<i>Bosmina hagmani</i>			x	x		x	x	x					
<i>Bosmina longirostris</i>	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	
<i>Bosmina tubicen</i>						x							
<i>Bosminopsis deitersi</i>			x	x		x	x	x	x	x		x	
<i>Camptocercus australis</i>		x	x	x	x			x			x		
<i>Ceriodaphnia cornuta</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
<i>Ceriodaphnia silvestri</i>				x				x		x			
<i>Chydorus cf. sphaericus</i>		x	x			x					x		
<i>Coronatella monacantha</i>	x			x			x		x	x	x		
<i>Dadaya macrops</i>		x	x										
<i>Daphnia gessneri</i>		x	x	x	x		x	x		x	x	x	
<i>Diaphanosoma birgei</i>		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
<i>Diaphanosoma spinulosum</i>		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	
<i>Disparalona leptorhyncha</i>								x			x		
<i>Ephemeroporus hybridus</i>							x				x		
<i>Flavalona iheringula</i>							x						
<i>Ilyocryptus spinifer</i>			x	x	x	x	x	x		x	x		
<i>Macrothrix laticornis</i>			x	x	x					x	x		
<i>Moina micrura</i>		x				x			x	x	x	x	
<i>Moina minuta</i>		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	
<i>Nicsmirnovius paggii</i>													
<i>Ovalona kaingang</i>					x		x	x			x		
<i>Scapholeberis rammneri</i>		x											
<i>Simocephalus latirostris</i>				x									
Copepoda													
<i>Argyrodiaptomus furcatus</i>			x										
<i>Diaptomus corderoi</i>			x										

Espécies	Rio tributário	Rio Doce				Lagos				Lagoas		
	E17	E0	E21	E22	E26	E18	E19	E20	E23	E24	E25	E25A
<i>Notodiaptomus conifer</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Notodiaptomus iheringi</i>		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Notodiaptomus isabelae</i>		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Notodiaptomus nordestinus</i>							x					
<i>Eucyclops cf elegans</i>		x	x	x								
<i>Eucyclops cf serrulatus</i>		x	x	x			x		x			
<i>Macrocyclus cf albidus</i>				x								
<i>Mesocyclops cf ellipticus</i>											x	
<i>Mesocyclops cf ogunnus</i>		x				x	x				x	x
<i>Mesocyclops meridianus</i>											x	
<i>Mesocyclops cf longisetus</i>		x	x	x		x	x	x			x	x
<i>Microcyclus anceps</i>	x	x				x	x	x			x	
<i>Microcyclus cf ceibaensis</i>											x	
<i>Thermocyclops decipiens</i>		x				x	x	x		x	x	x
<i>Thermocyclops minutus</i>		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Thermocyclops inversus</i>		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Total de espécies por estação amostral	19	39	42	48	34	39	39	47	31	32	52	41

Dentre as espécies listadas (tabela 1), a análise de IndVal indicou a prevalência de espécies generalistas como rotíferos cosmopolitas (*Brachionus falcatus*, *Conochilus* sp.) e os cladóceros *Bosminopsis deitersi* e *Ceriodaphnia cornuta*, além do copépodo Cyclopoida *Thermocyclops minutus* (Tabela 2).

Os microcrustáceos *Bosminopsis deitersi* e *Thermocyclops minutus* têm sido frequentemente associados a ambientes aquáticos impactados por rejeitos de mineração e drásticas alterações na cadeia trófica (Maia-Barbosa et al., 2006; Fragoso-Moura et al., 2016; Coelho et al., 2018). Os resultados obtidos até o momento para o zooplâncton dulcícola indicam que essas espécies podem constituir bioindicadores robustos do atual panorama ambiental dos ecossistemas lacustres do baixo Rio Doce. A espécie *Mesocyclops ogunnus* indicadora de ambientes fluviais, é considerada uma espécie exótica de origem afro-asiática (Peixoto et al., 2010), com registros associados a ambientes eutróficos (Matsumura-Tundisi and Silva, 2002). A espécie *Notodiaptomus iheringi* também pode ser considerada indicadora de ambientes com maior estado trófico (Sousa et al., 2008), uma condição descrita para as lagoas Juparanã e Nova, de acordo com os resultados obtidos no atual PMBA.

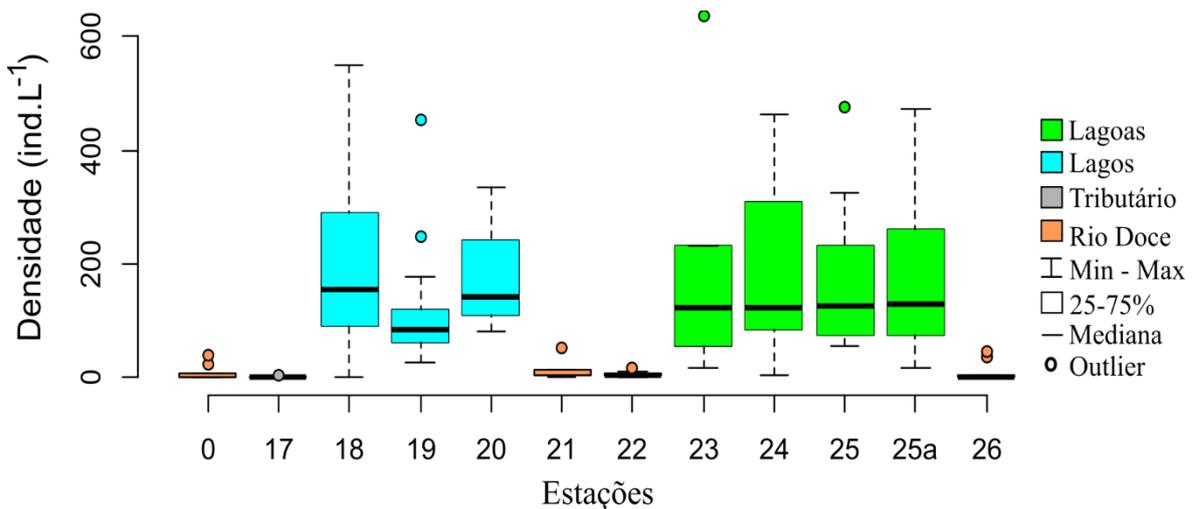
Tabela 2: Valor individual de indicação (IndVal) do zooplâncton encontrado nos ambientes estudados no contexto do projeto da RRDM durante o período de outubro de 2018 a agosto de 2019.

	Lagos		
	Valor de indicação (IndVal)	P	Ambiente indicado
<i>Bdelloida</i> ^R	0,7197	0,001	E19
<i>Brachionus falcatus</i> ^R	0,515	0,004	E18
<i>Ceriodaphnia cornuta</i> ^C	0,6659	0,001	E18
<i>Hexarthra</i> sp. ^R	0,2222	0,029	E18
<i>Themocyclops minutus</i> ^{COP}	0,4599	0,034	E20
	Lagoas		
	Valor de indicação (IndVal)	P	Ambiente indicado
<i>Bdelloida</i> ^R	0,6076	0,001	E24
<i>Bosminopsis deitersi</i> ^C	0,4989	0,004	E25
<i>Conochilus</i> sp. ^R	0,6237		E24
<i>Themocyclops minutus</i> ^{COP}	0,5936	0,003	E25
	Estações fluviais		
	Valor de indicação (IndVal)	P	Ambiente indicado
<i>Moina minuta</i> ^C	0,4287	0,017	E0
<i>Ilyocryptus spinifer</i> ^C	0,3	0,031	E0
<i>Mesocyclops ogunnus</i> ^{COP}	0,3323	0,036	E21
<i>Notodiptomus.iheringi</i> ^{COP}	0,2971	0,036	E26

3.2 DENSIDADE

A densidade zooplânctônica variou substancialmente entre os ambientes dulcícolas estudados (entre 0,1 Ind. L⁻¹ no Rio Doce a 731,97 Ind. L⁻¹ na Lagoa Monsarás), com valores mais elevados sempre observados nos sistemas lacustres (lagos e lagoas), em relação ao Rio Doce e Guandú (Figura 1). De forma geral, os valores de densidade dos lagos e lagoas são próximos aos observados em outros ecossistemas lênticos da Bacia do Rio Doce (Brito et al., 2011; Maia-Barbosa et al., 2014; Peixoto et al., 2008).

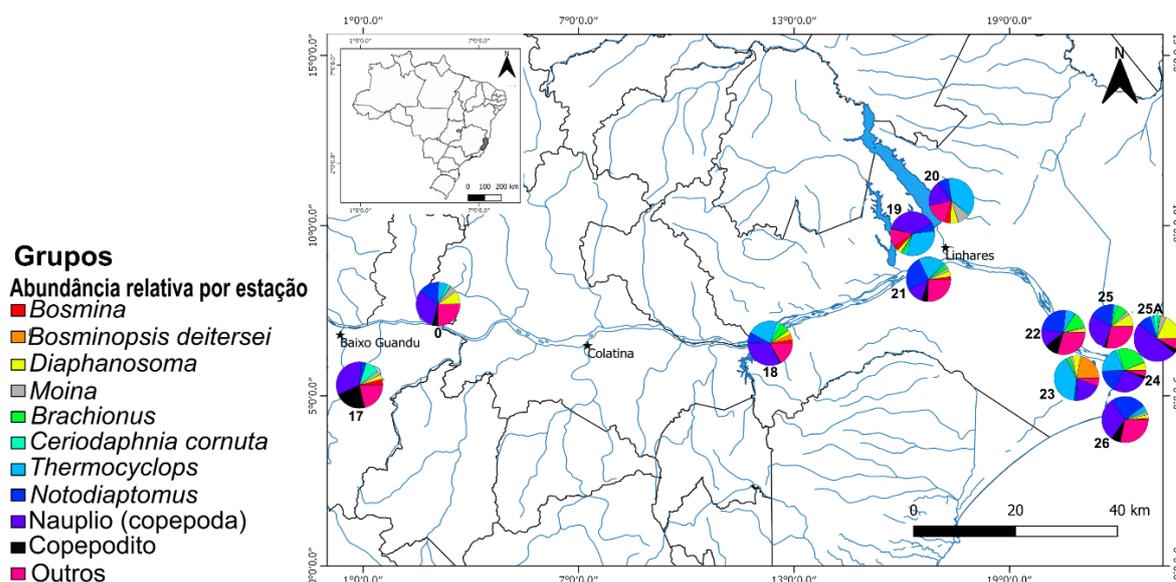
Figura 1: Densidade zooplânctônica (Ind. L⁻¹) entre os ambientes dulcícolas estudados no PMBA.



Náuplios de copepoda (notadamente de Calanoida) dominaram quantitativamente nas estações: E17, E0, E18, E19, E25 E 25A. Esse resultado confirma a ocorrência de recrutamento do zooplâncton dulcícola, indicativo do estabelecimento das populações atuais (Figura 2). Além disso, a dominância de náuplios pode estar relacionada com a presença de predadores, uma vez que há ocorrência de várias espécies de peixes zooplanctófagas nas lagoas, como apontado no presente PMBA, que são considerados predadores visuais (Iglesias et al., 2011). Assim, organismos zooplanctônicos maiores são mais susceptíveis a predação, influenciando diretamente a estrutura de tamanho das comunidades zooplanctônica (Chaparro et al., 2015).

Nas estações amostrais E21, E22, E26 a comunidade zooplanctônica exibiu maior abundância de adultos de copépodos do gênero *Notodiaptomus* e *Thermocyclops*, indicando maior recrutamento dos organismos zooplanctônicos nas estações amostrais à montante da foz do Rio Doce. Esse fenômeno caracteriza a importância das lagoas costeiras do Rio Doce como áreas relevantes na estruturação e recomposição de indivíduos do zooplâncton dulcícola da área.

Figura 2: Abundância relativa por grupo e estação. Estações: 17 Rio Guandu; 0 Jusante; 18 Lago Limão; 19 Lago Nova; 20 Lago Juparanã; 21 Rio Doce; 22 Rio Doce; 23 Lagoa Areão; 24 Lagoa Areal; 25 e 25A Monsarás e 23 Foz do Rio Doce



Em termos de respostas às condições ambientais, foi observada correlação negativa significativa entre a densidade zooplanctônica e a presença dos metais Al, Fe, Cr e V na água ($p < 0,05$), como revela a Figura 3, indicando a ocorrência de processos de interferência na densidade do zooplâncton, em resposta à qualidade ambiental (Figura 4).

Figura 3: Análise de correlação (Spearman) entre os dados de densidade do zooplâncton (ind.L^{-1}) e os metais: Al, Fe, Cr e V. Dados obtidos no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.

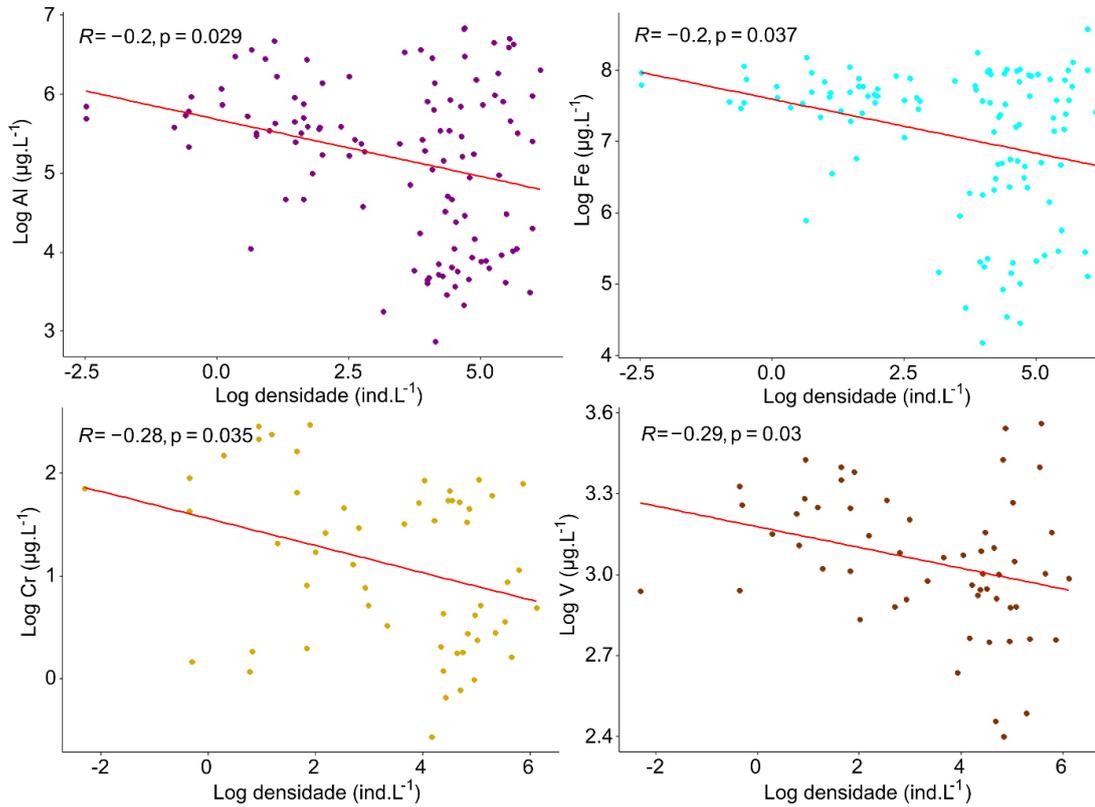
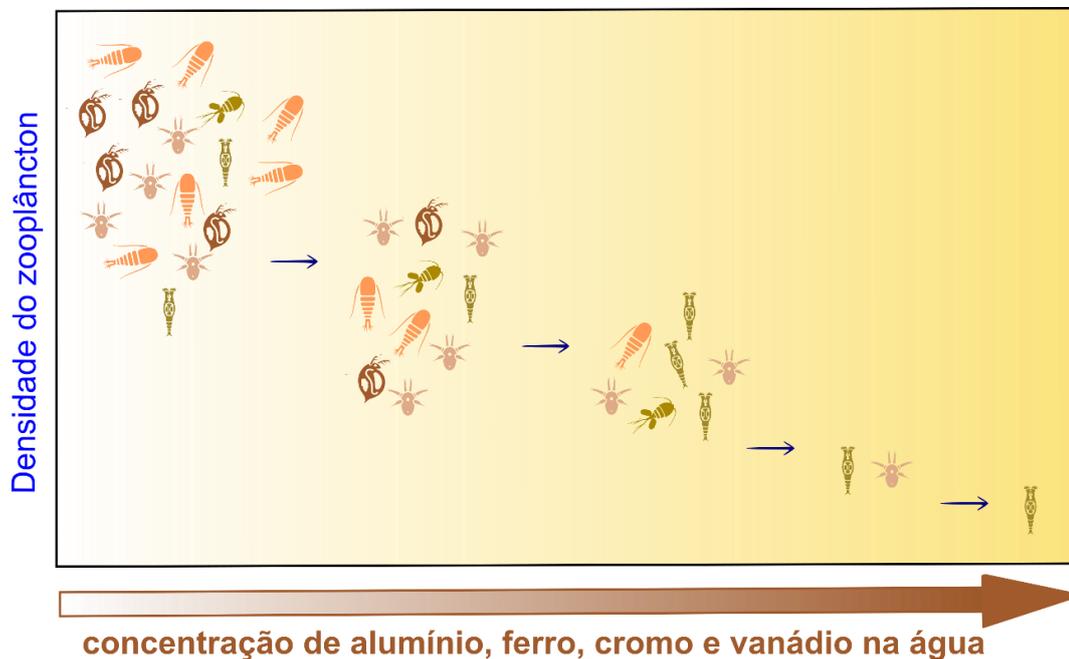


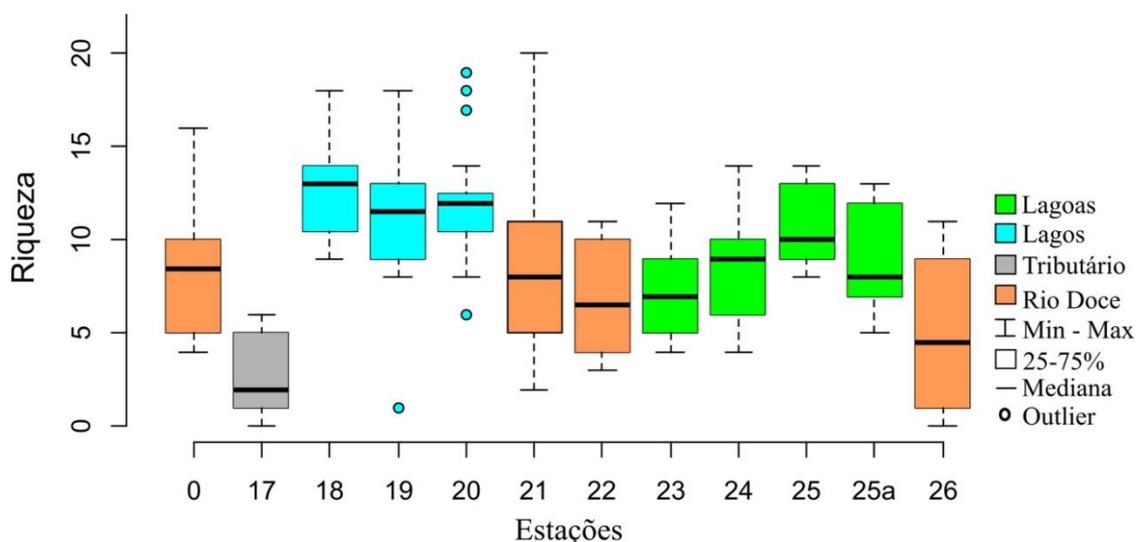
Figura 4: Diagrama ilustrativo mostrando a relação negativa da densidade de zooplâncton com a concentração de Al, Fe, Cr e V.



3.3 RIQUEZA (S)

A riqueza da comunidade zooplancônica variou entre 0 (Rio Guandú) a 23 (Rio Doce), com tendência de maior diversificação nos ecossistemas lacustres (Figura 5).

Figura 5: Riqueza do zooplâncton nos ambientes estudados no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.



A exemplo do que ocorreu na densidade zooplancônica, foi perceptível também a correlação negativa da concentração de metais Al, Fe, Cr e V sobre a diversidade zooplancônica (Figura 6 e Figura 7).

Para a avaliar a comunidade zooplancônica ao longo da bacia do Rio Doce, dados da riqueza zooplancônica de ambientes fluviais de Minas Gerais (porção não afetada pelo rejeito de mineração), obtidos através do projeto PELD/UFMG foram comparados com os dados obtidos no presente PMBA no Espírito Santo (porção afetada pelo rejeito). Para essa análise comparativa, foram utilizados dados dos Rios Caraça (controle), Rio Piracicaba e Rio Doce em Minas Gerais, coletados entre os anos 2000 a 2006, perfazendo um total de 38 amostras. Para a região do Baixo Rio Doce (ES), os pontos amostrais utilizados foram os localizados no Rio Guandu (E17 - controle), Jusante (E0), Rio Doce (E21 e E22) e Foz do Rio Doce (E26), coletados entre outubro/2018 a agosto/2019, englobando um total de 41 amostras.

Figura 6: Análise de correlação (Spearman) entre os dados de riqueza e diversidade (Shannon) do zooplâncton (ind.L-1) e os metais: Al, Fe e V. Dados obtidos no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.

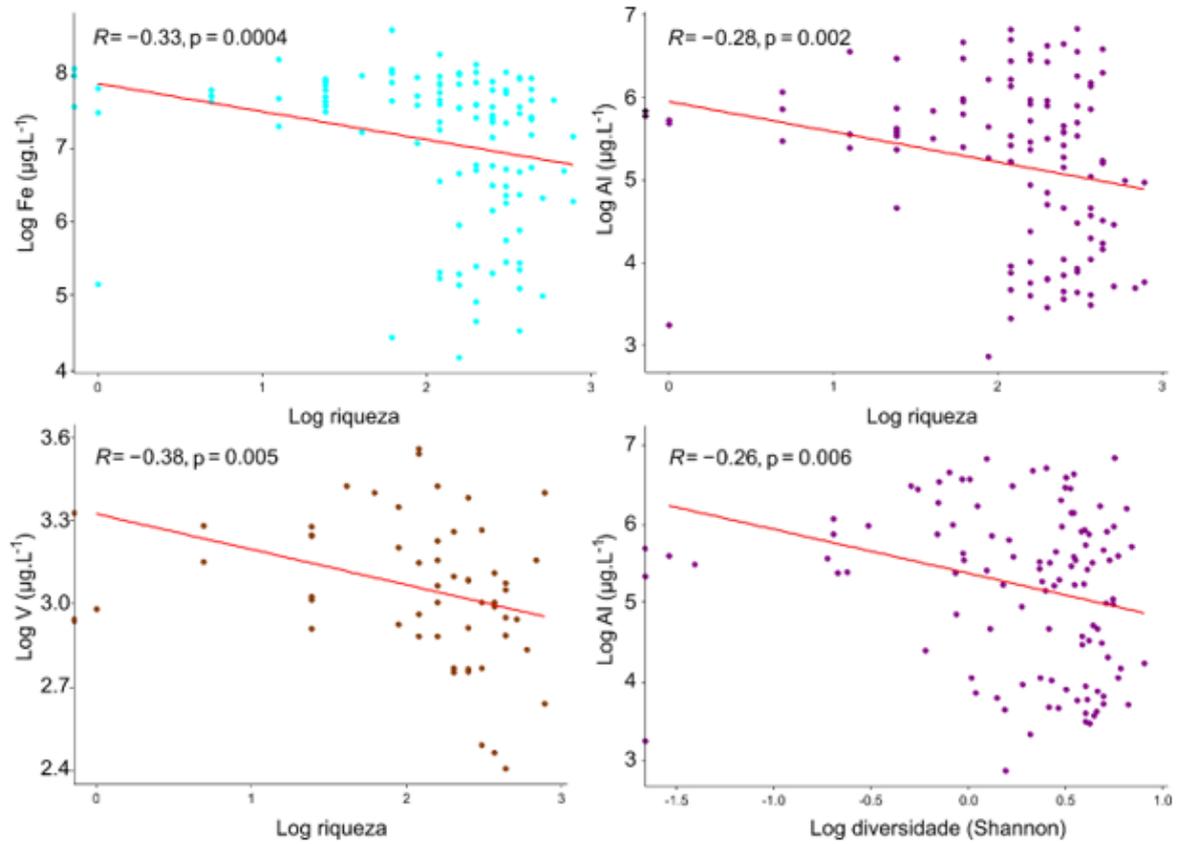
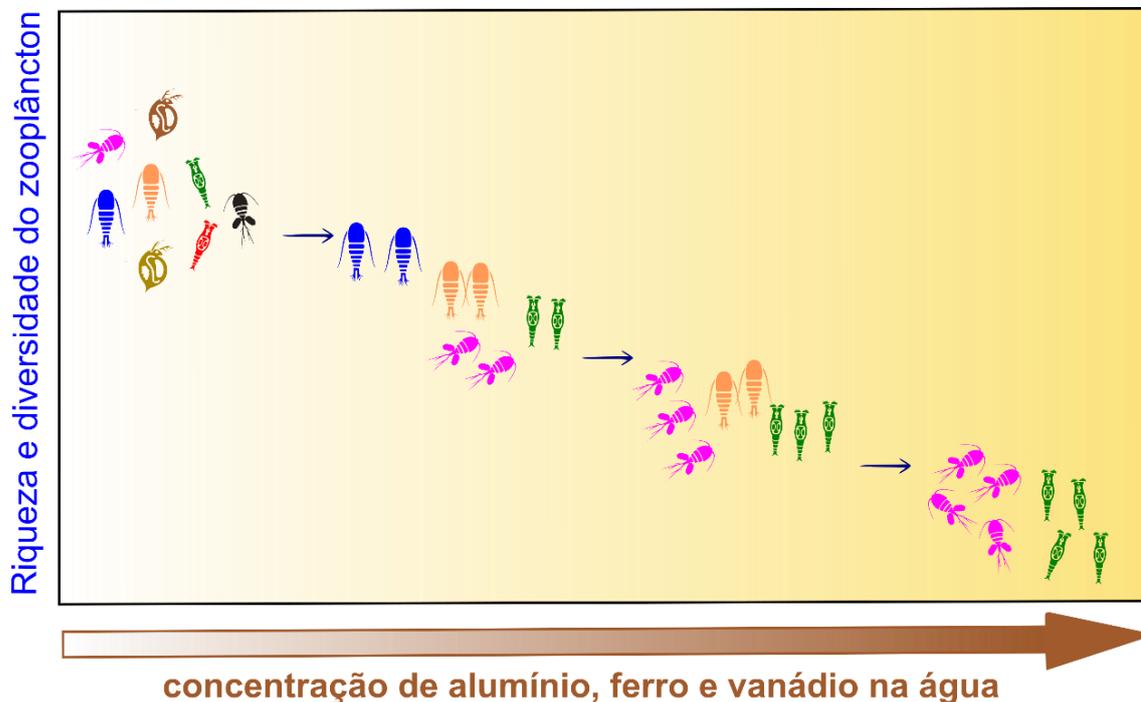


Figura 7: Diagrama ilustrativo mostrando a relação da riqueza de Zooplâncton com a concentração de Al, Fe e V.



A riqueza de espécies entre Médio e Baixo Rio Doce foi estatisticamente diferente (Mann-Whitney, $p=0,03$), sendo encontrada maior riqueza para os trechos fluviais em MG (figura 8). A composição da comunidade zooplanctônica também apresenta diferença significativa entre as duas regiões (Permanova; $p=0,03$) (Tabela 3).

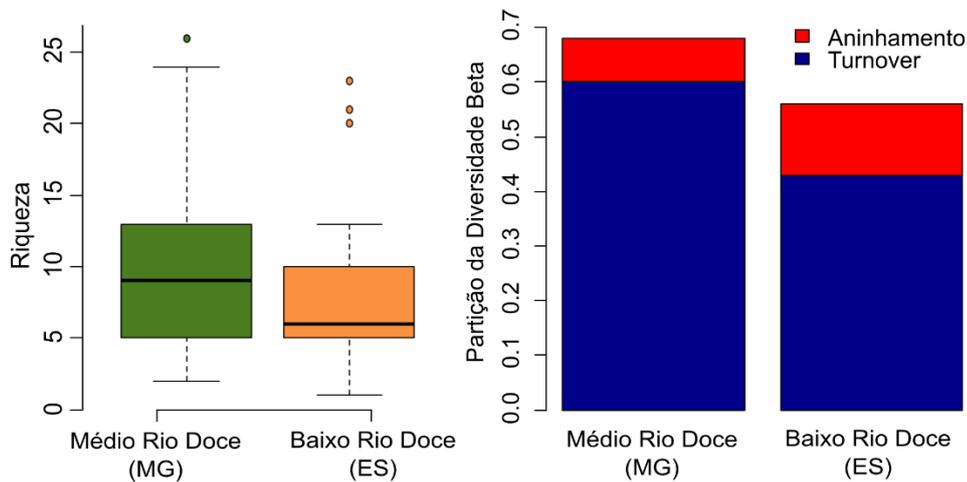
Tabela 3: Resultados da análise de Permanova da riqueza zooplanctônica entre diferentes trechos da bacia do Rio Doce (ES e MG).

Fator	df	SS	MS	F Model	R2	P (Perm)
Riqueza Estado	1	0.09173	0.091732	4.2953	0.05163	0.030*
Dados Ano	1	0.06191	0.061909	2.8988	0.03484	0.065
Resíduo	76	1.62310	0.021357		0.91353	
Total	78	1.77674			1.00000	

A porção do baixo Rio Doce no ES apresentou uma menor diversidade beta (turnover 0.43 e aninhamento 0.13) e maior influência por aninhamento, em relação ao Médio Rio Doce (turnover 0.60 e aninhamento 0.08) (Figura 8), caracterizando uma comunidade com composição de espécies mais semelhantes (Lopes et al., 2014). Em ambientes dulcícolas que passaram por algum tipo de perturbação, a estrutura da comunidade zooplanctônica pode ser alterada, reduzindo a diversidade beta e favorecendo espécies mais tolerantes ao estresse ambiental (Bonecker et al., 2013; Kimbro and Grosholz, 2006). O entendimento dos processos que conduzem à formação de assembleias características das condições ambientais é um dos grandes desafios da Ecologia de Comunidades. A coexistência de muitas espécies em condições ambientais amenas é razoavelmente possível. Contudo, em condições ambientais limitantes, apenas as espécies mais resistentes são capazes de se manter (Ortega et al., 2018). Dessa forma, considerando um gradiente de impacto, espera-se que a fauna no extremo da condição ambiental seja constituída por um subconjunto das espécies presentes na porção mais amena desse gradiente. Esse fenômeno, definido como aninhamento, é de grande relevância no entendimento do efeito de alterações ambientais na estrutura das comunidades. O aninhamento ocorre em função da perda não aleatória de espécies, ou seja, a assembleia final será um resultante dos processos seletivos de espécies mais resistentes ou menos sensíveis. O fenômeno de aninhamento influencia a diversidade beta, definida como o grau de dissimilaridade existente entre as comunidades de duas áreas distintas (Baselga, 2010). A diversidade beta (β diversity) também sofre influência do fenômeno de substituição de espécies (*turnover*), que consiste na substituição de espécies entre áreas, seja por seleção de espécies em função das características ambientais, por restrições históricas e espaciais na colonização de sítios espaciais, ou ainda por interações interespecíficas (predação, competição, por exemplo). A diversidade beta também está diretamente relacionada com a heterogeneidade ambiental, proporcionando maior variedade de condições para diferentes tipos de espécies (Soares et al., 2015).

Os resultados obtidos com a análise espacial da diversidade β do zooplâncton dulcícola indicaram que filtros seletivos atuaram fortemente na estruturação da comunidade, o que pode explicar o fato de a região do ES apresentar menor riqueza e diversidade beta, em relação à porção à jusante do Rio Doce em MG. Vale destacar que a ausência de dados pretéritos pré-derramamento dificulta a indicação mais assertiva dos fatores que regem a atual estrutura da comunidade zooplanctônica nos ecossistemas lacustres do Baixo Rio Doce.

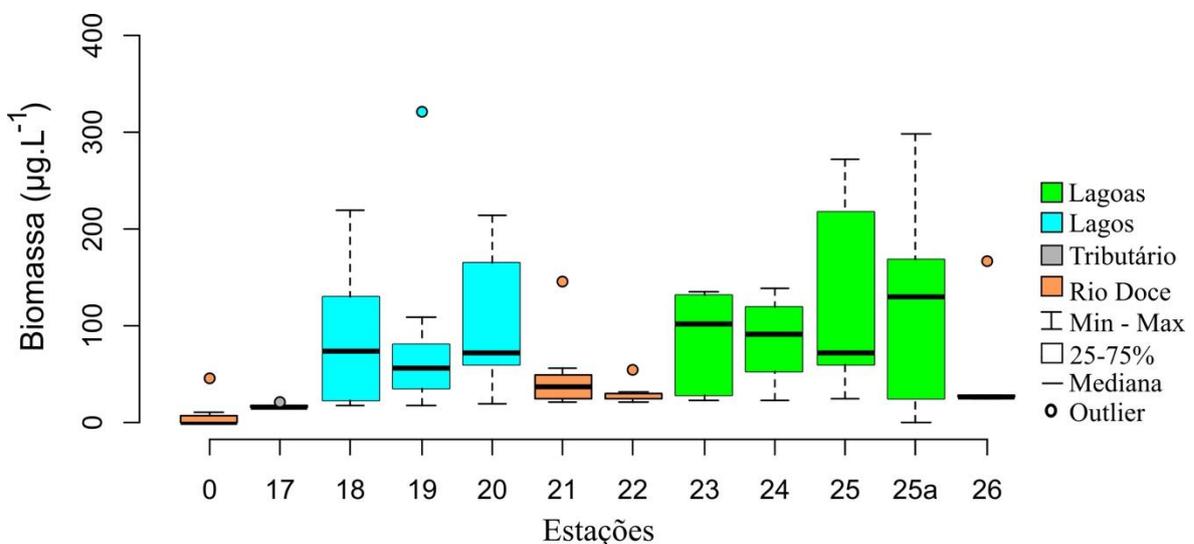
Figura 8: Riqueza e diversidade beta das regiões do médio e baixo Rio Doce.



3.4 BIOMASSA

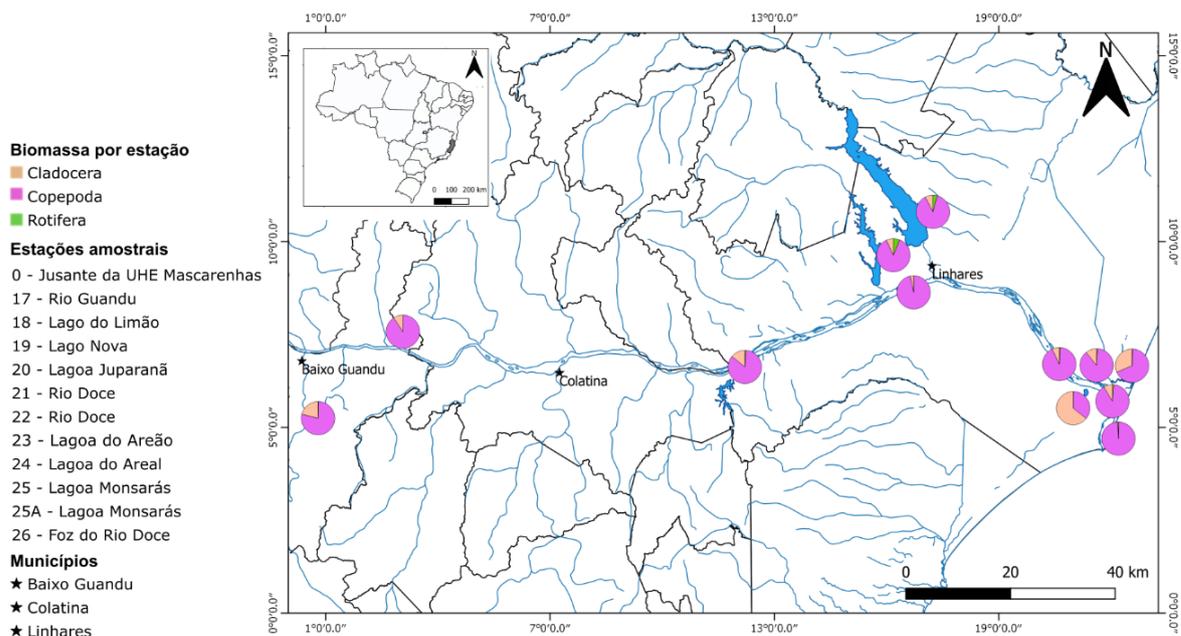
A biomassa zooplanctônica variou entre $0,6 \mu\text{g.L}^{-1}$ na Lagoa do Limão a $1450,2 \mu\text{g.L}^{-1}$ na Lagoa Monsarás, com valores mais elevados sendo registrados nos ecossistemas lênticos (Figura 9).

Figura 9: Variação da biomassa zooplanctônica ($\mu\text{g.L}^{-1}$) nos ecossistemas estudados no âmbito da RRDM.



Foi observada uma grande contribuição de copépodes para biomassa, em sua maioria pertencentes à classe Cyclopoida, em quase todas as estações de coleta (Figura 10). Copépodes da classe Cyclopoida, de uma forma geral, são considerados generalistas, ou seja, esses organismos se adaptam bem às condições ambientais de ampla variabilidade (Perbiche-Neves et al., 2016). Por apresentarem em geral, hábito alimentar onívoro, copépodes ciclopóides podem mudar a dieta baseado nas ofertas de alimento presentes no ambiente. A oferta de alimentos de boa qualidade nutricional e/ou tamanho adequados pode ser restrita em regiões impactadas, o que desfavorece a presença de muitas espécies de cladóceros e copépodes da classe Calanoida (Costa et al., 2016; Nogueira, 2001).

Figura 10: Biomassa ($\mu\text{g.Peso Seco. L}^{-1}$) dos grandes grupos do zooplâncton (Rotifera, Cladocera e Copepoda) nos ambientes estudados durante o período de outubro de 2018 a julho de 2019 no contexto do projeto da RRDm.



A análise de correlação entre a razão da biomassa zooplâncton: fitoplâncton e a concentração de Alumínio revelou que o aumento da biomassa do zooplâncton é correspondido pelo aumento na biomassa fitoplânctônica, ou seja, ocorre oferta de alimento nos ambientes, mas detectou uma relação linear negativa (Figura 11), indicando que o aumento das concentrações desse elemento metálico no ambiente atuou de forma decisiva no controle da biomassa planctônica nos ambientes estudados. Esse resultado sugere uma interferência do elemento Alumínio no fluxo de energia entre os compartimentos basais da comunidade planctônica (Figura 12).

Figura 11: Análise de correlação (Spearman) entre a razão da biomassa zooplâncton:fitoplâncton ($\mu\text{g.L}^{-1}$) e os metal Al. Dados obtidos no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.

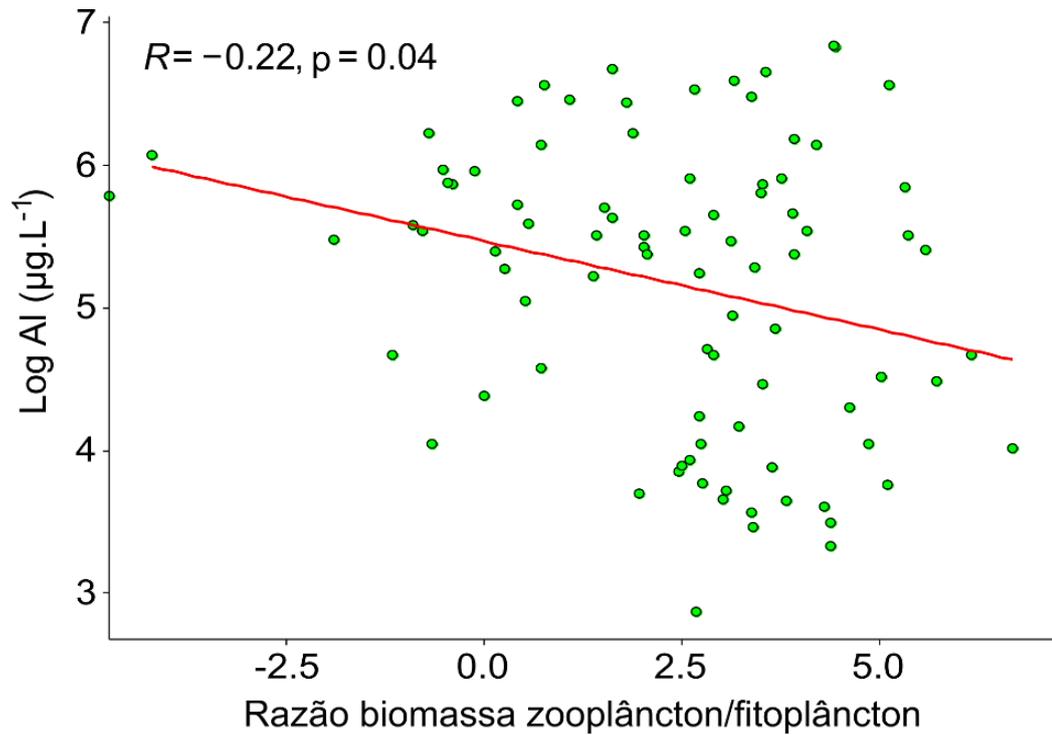
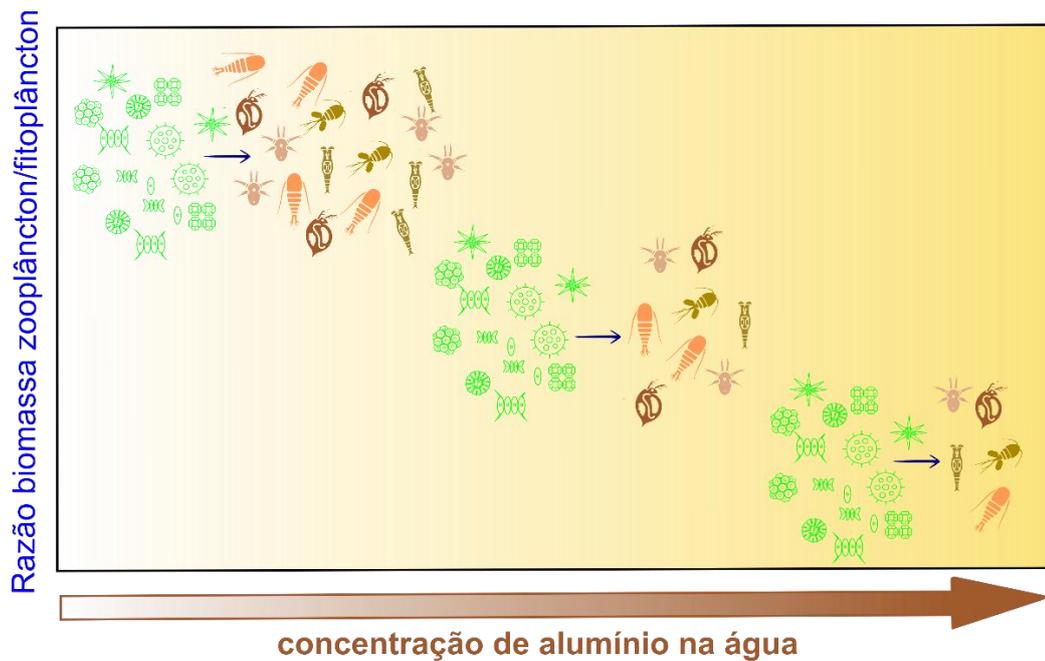
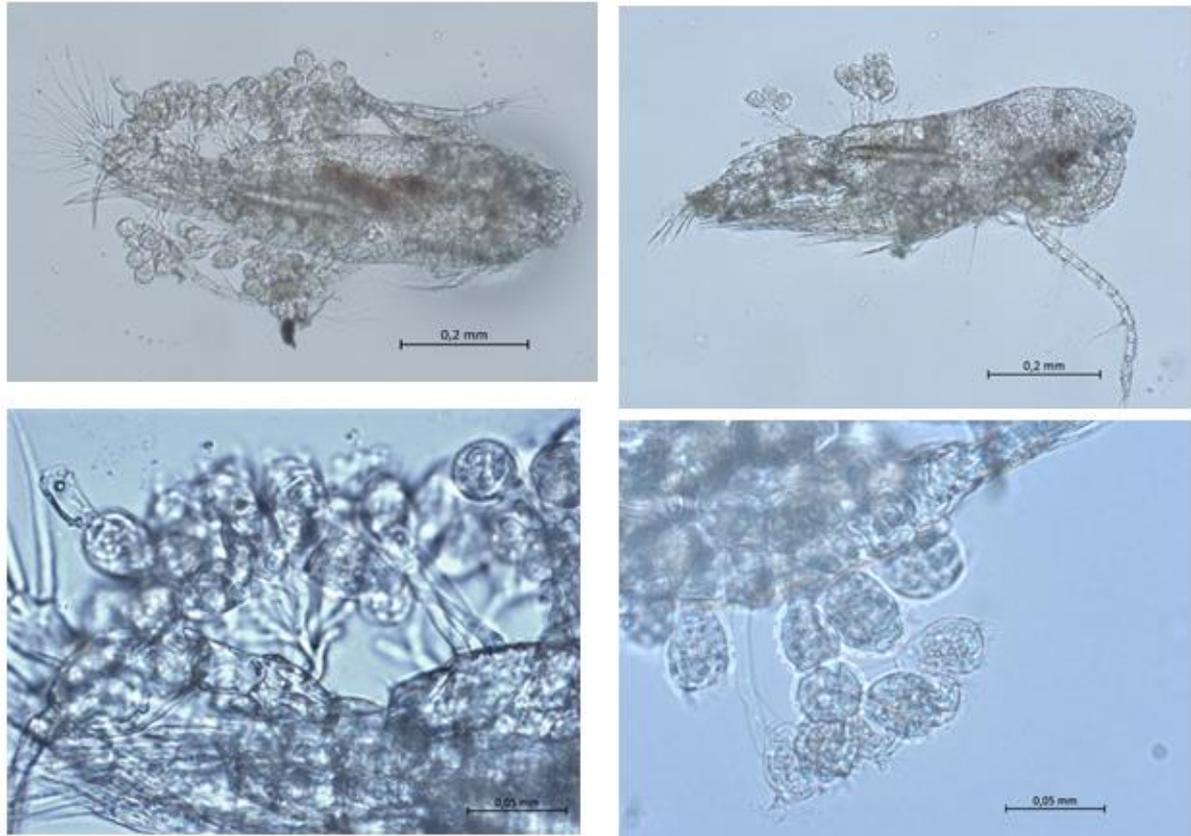


Figura 12: Diagrama ilustrativo mostrando a razão da biomassa zoo/fitoplâncton com a concentração de Al.



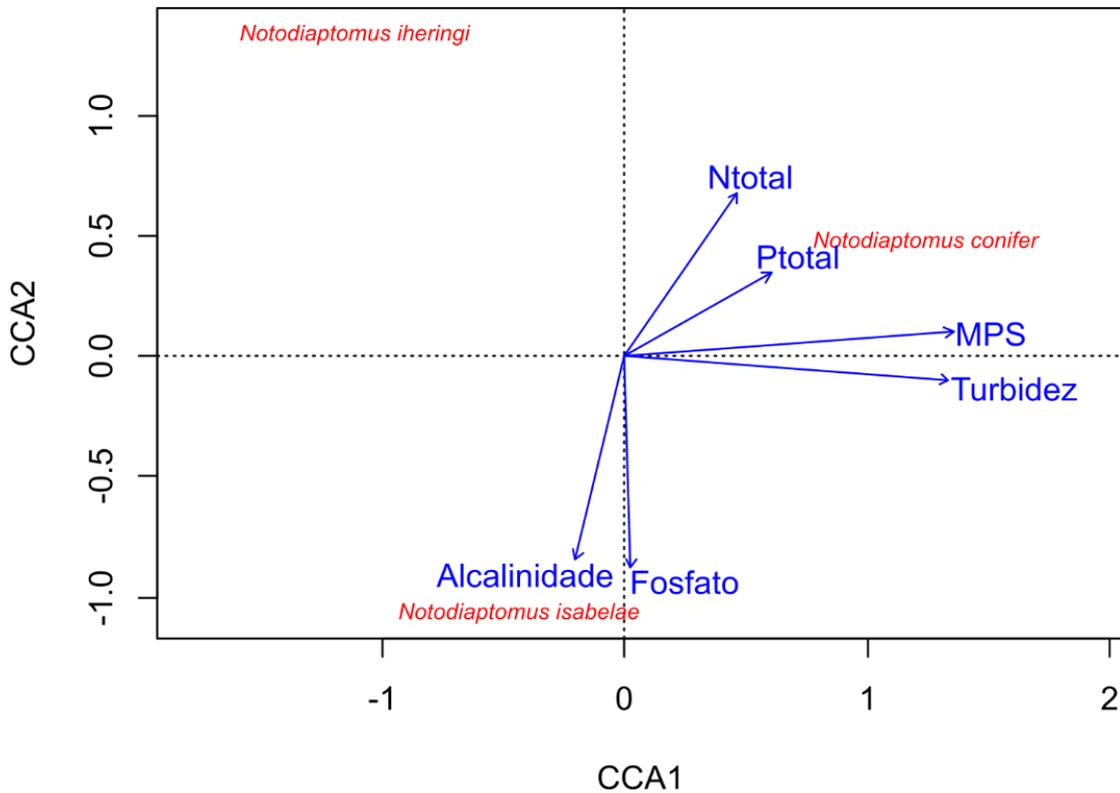
Durante a análise do zooplâncton foram detectados alguns espécimes de copépodes infectados com epibiontes parasitas (em fase de identificação) (Figura 13).

Figura 13: Aspecto geral dos copépodos Calanoida registrados nas amostras do PMBA do Rio Doce, com epibiontes superficiais aderidos.



Foi realizada uma análise de correspondência canônica (ACC) para verificar se as variáveis ambientais e as concentrações de metais na água explicavam a densidade de copépodos parasitados (variável resposta). A ACC apresentou uma significância de $p = 0.005$ (teste de permutação) onde os dois primeiros eixos explicaram 60% da variância total. Foi observado que a turbidez, a alcalinidade, o nitrogênio e o fósforo totais ($\mu\text{g.L}^{-1}$) estão fortemente correlacionadas com a densidade de organismos infectados, representados principalmente pelas espécies de copépodos *Notodiaptomus conifer* e *N. isabala* (Figura 14). O registro de espécimes de copépodos e cladóceros parasitados merece atenção e será alvo de novos estudos a partir da continuidade do PMBA.

Figura 14: Análise de correspondência canônica com base nos dados de copépodos parasitados e variáveis limnológicas. Dados obtidos no contexto do projeto RRDM de outubro de 2018 a agosto de 2019.



3.5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Foram identificados 99 táxons na comunidade zooplânctônica do Baixo Rio Doce, incluindo a ocorrência da espécie invasora de copépodo *Mesocyclos ogunnus*, além de espécies indicadoras de ambientes impactados (o cladóceros *Bosminopsis deitersi* e o copépodo *Thermocyclos minutus*). Esses resultados são indicativos de uma condição de distúrbio nos ambientes aquáticos dulcícolas. Em termos de abundância e biomassa do zooplâncton, os dados obtidos são próximos aos observados para outras regiões do Médio Rio Doce em Minas Gerais, indicando que a comunidade zooplânctônica na região tem apresentado mecanismos de recolonização e recomposição quantitativa das populações. Todavia, a análise da diversidade beta no médio e baixo Rio Doce indicou que nos ambientes atingidos pelo rejeito de minério ocorreu uma homogeneização biótica com perda de espécies, que não foi observada nos dados pretéritos na porção do médio Rio Doce.

Adicionalmente, foi claramente perceptível a relação negativa entre a densidade zooplânctônica e a concentração de Alumínio, Ferro, Cromo e Vanádio na água. Também foi observada uma relação negativa entre a riqueza de espécies do zooplâncton e a concentração de metais na água, sugerindo que a permanência desses metais, nos ambientes estudados, pode culminar na diminuição da riqueza, com reflexos potenciais na organização estrutural da comunidade zooplânctônica a longo prazo. A interferência do elemento Alumínio também foi destacada na conexão trófica do zooplâncton:fitoplâncton, com fortes indícios de efeito negativo na troca de energia entre esses compartimentos tróficos basais. Embora ainda de maneira preliminar, foi observada a ocorrência de

espécimes de copépodos e cladóceros parasitados. Esse parasitismo de interferência interespecífica parece estar fortemente relacionado com valores elevados de indicadores de eutrofização (turbidez, alcalinidade, nitrogênio e fósforo total), e merece estudos adicionais. Os ambientes lacustres (lagos e lagoas) podem ser considerados como áreas “hotspots” para a região, por abrigarem assembleias específicas e maior riqueza de espécies em relação à calha fluvial. Esforços para conservação desses sistemas lacustres devem ser fortemente considerados nas estratégias futuras de restauração do Baixo Rio Doce.

4 REFERÊNCIAS

- Amsinck, S. L.; Jeppesen, E. & Verschuren, D. (2007). Use of Cladoceran Resting Eggs to Trace Climate-driven and Anthropogenic Changes in Aquatic Ecosystems. *Diapause in Aquatic Invertebrates*. p.135-157.
- Baselga, A., 2010. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19, 134–143.
- Bays, S. & Crisman, T.L. 1983. Zooplankton and trophic state relationships in Florida lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 40: 1813-1819.
- Bicudo, C. E M. & Bicudo, D. C. (2007). *Amostragem em Limnologia*. Cap 9: Métodos de coleta, preservação, contagem e determinação de biomassa em zooplâncton de águas epicontinentais. 2ª ed. São Carlos, SP.
- Bjerring, R. & Amsinck, S. L. (2011). Zooplankton as indicators in lakes - a plea for including zooplankton in the ecological quality assessment of lakes according to the European Water Framework Directive (WFD). – *Hydrobiologia*, v.676, p.270-297.
- Bonecker, C.C., Simões, N.R., Minte-Vera, C.V., Lansac-Tôha, F.A., Velho, L.F.M., Agostinho, Â.A., 2013. Temporal changes in zooplankton species diversity in response to environmental changes in an alluvial valley. *Limnologica* 43, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2012.07.007>
- Brito, S.L., Maia-Barbosa, P.M., Pinto-Coelho, R.M., 2011. Zooplankton as an indicator of trophic conditions in two large reservoirs in Brazil. *Lakes Reserv. Res. Manag.* 16, 253–264.
- Chaparro, G., Fontanarrosa, M.S., Cataldo, D., O’Farrell, I., 2015. Hydrology driven factors might weaken fish predation effects on zooplankton structure in a vegetated warm temperate floodplain lake. *Hydrobiologia* 752, 187–202.
- Costa, B.N.S., Pinheiro, S.C.C., de Oliveira Lima, M., Amado, L.L., 2016. Microzooplankton as an indicator of environmental quality at an industrial complex in the Brazilian Amazon. *Ecol. Indic.* 66, 220–229.

- Dufrêne, M. & Legendre, P. Species assemblages and indicator species: the need for flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, v. 67, n. 3, p. 345-366, 1997.
- Elmoor-Loureiro, M. A. L. (1997). Manual de identificação de cladóceros límnicos do Brasil. Editora Universa, Brasília – DF.
- Iglesias, C., Mazzeo, N., Meerhoff, M., Lacerot, G., Clemente, J.M., Scasso, F., Kruk, C., Goyenola, G., García-Alonso, J., Amsinck, S.L., 2011. High predation is of key importance for dominance of small-bodied zooplankton in warm shallow lakes: evidence from lakes, fish enclosures and surface sediments. *Hydrobiologia* 667, 133–147.
- Jeppesen, E., Peder Jensen, J., SØndergaard, M., Lauridsen, T., & Landkildehus, F. (2000). Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient. *Freshwater Biology*, 45(2), 201–218.
- Kimbrow, D.L., Grosholz, E.D., 2006. Disturbance influences oyster community richness and evenness, but not diversity. *Ecology* 87, 2378–2388.
- Lopes, P.M., Bini, L.M., Declerck, S.A.J., Farjalla, V.F., Vieira, L.C.G., Bonecker, C.C., Lansac-Toha, F.A., Esteves, F.A., Bozelli, R.L., 2014. Correlates of zooplankton beta diversity in tropical lake systems. *PLoS One* 9, e109581.
- Maia-Barbosa, P.M., Menendez, R.M., Pujoni, D.G.F., Brito, S.L., Aoki, A., Barbosa, F.A.R., 2014. Zooplankton (Copepoda, Rotifera, Cladocera and Protozoa: Amoeba Testacea) from natural lakes of the middle Rio Doce basin, Minas Gerais, Brazil. *Biota Neotrop.* 14.
- Matsumura-Tundisi, T., Silva, W.M., 2002. Occurrence of *Mesocyclops ogunnus* Onabamiro, 1957 (Copepoda Cyclopoida) in water bodies of São Paulo state, identified as *Mesocyclops kieferi* Van de Velde, 1984. *Brazilian J. Biol.* 62, 615–620.
- Nogueira, M.G., 2001. Zooplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Paranapanema River), São Paulo, Brazil. *Hydrobiologia* 455, 1–18.
- Ortega, J.C.G., Thomaz, S.M., Bini, L.M., 2018. Experiments reveal that environmental heterogeneity increases species richness, but they are rarely designed to detect the underlying mechanisms. *Oecologia* 188, 11–22.
- Peixoto, RS; Sá, CEM; Guimarães, AS and Maia-Barbosa, P., 2008. Seasonal fluctuations of the microcrustacean assemblages in the littoral zone of Lake Dom Helvécio (Parque Estadual do Rio Doce, MG). *Acta Limnol. Bras* 20, 213–219.
- Peixoto, R.S., Brandão, L.P.M., Valadares, C. de F., Barbosa, P.M.M., 2010. Occurrence of *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) and *Mesocyclops ogunnus* Onabamiro, 1957 in lakes of the Middle River Doce, MG, Brazil. *Acta Limnol. Bras.* 22, 356–360.

- Perbiche-Neves, G., Saito, V.S., Previattelli, D., Da Rocha, C.E.F., Nogueira, M.G., 2016. Cyclopoid copepods as bioindicators of eutrophication in reservoirs: Do patterns hold for large spatial extents? *Ecol. Indic.* 70, 340–347.
- Primo, A., Kimmel, D., Marques, S., Martinho, F., Azeiteiro, U., & Pardal, M. (2015). Zooplankton community responses to regional-scale weather variability: a synoptic climatology approach. *Climate Research*, 62(3), 189–198.
- Santos–Wisniewski, M. J.; Rocha, O.; Guntzel, A. M. & Matsumura–Tundisi, T. (2002). Cladocera Chydoridae of high Altitude water bodies (Serra da Mantiqueira), in Brazil. *Brazilian Journal. Biol.*, v.62, n.4A, p.681–687.
- Soares, C.E.A., Velho, L.F.M., Lansac-Tôha, F.A., Bonecker, C.C., Landeiro, V.L., Bini, L.M., 2015. The likely effects of river impoundment on beta-diversity of a floodplain zooplankton metacommunity. *Nat. Conserv.* 13, 74–79.
- Soranno, P.A., Carpenter, S.R. & He, X. 1985. Zooplankton biomass and body size. In: Carpenter, S.R & Jitchell, F. (eds). *The Trophic Cascade in Lakes*. Cambridge Pergamon press, 381p., pp. 172-188.
- Sousa, W., Attayde, J.L., Rocha, E.D.S., Eskinazi-Sant'Anna, E.M., 2008. The response of zooplankton assemblages to variations in the water quality of four man-made lakes in semi-arid northeastern Brazil. *J. Plankton Res.* 30, 699–708.