

IDENTIFICANDO AS ESCALAS DE VARIABILIDADE DA COMUNIDADE DE MACROINVERTEBRADOS BENTÔNICOS NA BACIA DO RIO FORQUETA, RS

Andreia Aparecida Guimarães Strohschoen¹
Norma Luiza Würdig²

RESUMO

O estudo da estrutura das comunidades de macroinvertebrados bentônicos considerando múltiplas escalas espaciais tem sido atualmente um dos principais objetos de estudo na ecologia de bentos. Objetivou-se neste estudo analisar a variabilidade da comunidade de macroinvertebrados bentônicos em três escalas espaciais (rio, segmento de rio e mesohábitat) na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil), enfatizando quais escalas espaciais melhor explicam a estrutura da comunidade nesta bacia. Investigou-se a porcentagem da variabilidade na riqueza de organismos pode ser explicada pelos descritores ambientais locais e quais influenciam na estrutura da comunidade. As amostragens seguiram um delineamento amostral hierárquico. Foram amostrados oito segmentos de rio, formados pelos mesohábitats: corredeira e remanso, no verão de 2008. A *nested* Anova mostrou que a comunidade de macroinvertebrados bentônicos varia nas três escalas analisadas, sendo que a comunidade está estruturada principalmente de acordo com a escala de mesohábitat. A Análise de Redundância parcial (pRDA) evidenciou alcalinidade, condutividade, dureza, sólidos totais dissolvidos e temperatura da água como os descritores que mais contribuíram para explicar a estrutura espacial da comunidade. A partilha da variância mostrou que 12,5% da variabilidade da comunidade foi explicada puramente pelos descritores ambientais. Os resultados mostram a correspondência entre a distribuição das comunidades de macroinvertebrados bentônicos e os descritores ambientais, demonstrando a importância das variações em mesoescala para o estudo da distribuição destes organismos.

Palavras-chave: Escala espacial, Análise espacial hierárquica, Partição de variância, Descritores ambientais.

¹ Doutora em Ciências, Ecologia pela UFRGS. Professora Titular do Centro Universitário UNIVATES. Professora e orientadora nos Programas de Pós graduação: Mestrado em Ensino e Mestrado em Ensino de Ciências Exatas. Centro Universitário UNIVATES. Av. Avelino Tallini, 171, Universitário. 95900-000 - Lajeado/RS. Telefone: (51) 37147000 - Ramal: 5418. E-mail para contato: aaguim@univates.br

² Doutora em Geociências. Professora Associada IV da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Zoologia. Av. Bento Gonçalves n 9500, Agronomia. 91501-970 - Porto Alegre, RS, Brasil.

IDENTIFYING THE SCALES OF VARIABILITY OF THE BENTHIC MACROINVERTEBRATE COMMUNITY IN THE RIO FORQUETA, SOUTHERN BRAZIL

ABSTRACT

The study of the structure of benthic macroinvertebrate communities considering multiple spatial scales has recently been one of the main objects of study in the ecology of benthos. The aim of this study was to analyze the variability of the macroinvertebrate community at three spatial scales (river, river segment and Mesohabitat) in Bacia hidrográfica do Rio Forqueta (southern Brazil), emphasizing spatial scales which best explain the community structure in the basin. Furthermore, we investigated the percentage of variability in the richness of organisms can be explained by the environmental descriptors and local descriptors which measured environmental influences on community structure. Sampling followed a hierarchical sampling design. We sampled eight segments of the river, formed by mesohabitats: riffles and pools in the summer of 2008. The nested ANOVA showed that the benthic macroinvertebrate community varies in the three scales, although the community is organized mainly according to the scale of Mesohabitat. Partial Redundancy Analysis (pRDA) showed alkalinity, conductivity, hardness, total dissolved solids and water temperature as descriptors have contributed most to explain the spatial structure of the community. The partition of variance showed that 12.5% of the variability of community was explained by purely environmental descriptors. The results show correlation between the distribution of benthic communities macroinvertebrates and environmental descriptors, demonstrating the importance of variations in mesoscale to study the distribution of these organisms.

Keywords: Environmental descriptors, Hierarchical spatial analysis, Partition the variance, Spatial scale.

INTRODUÇÃO

Os rios são sistemas que apresentam grande heterogeneidade quando considerados em diferentes escalas, desde o nível de micro-habitat até o nível de macro-habitat (paisagem). Isto é refletido na distribuição e abundância de organismos através de múltiplas escalas espaciais (Heino *et al.*, 2004; Stevens e Connolly, 2004). Dentro desse sistema, as comunidades aquáticas passam pelos diversos filtros ecológicos de múltiplas escalas, desde a escala de paisagem até a de microhabitat, para então se estabelecerem (Frissell *et al.*, 1986; Poff, 1997). Assim, habitats com características ambientais semelhantes podem ter comunidades estruturalmente similares (Bonada *et al.*, 2008).

As características ambientais locais sempre foram consideradas determinantes da diversidade local, porém, recentemente o padrão das comunidades tem sido considerado como resultante de interações de causas múltiplas. Onde, a estrutura das comunidades é deve-se aos fatores ambientais locais e regionais, visto que as características regionais exercem influência hierárquica nas escalas menores, dirigindo a distribuição das espécies que respondem ao gradiente ambiental (Frissell *et al.*, 1986). As comunidades de macroinvertebrados bentônicos além de refletirem esta variação natural dos fatores

ambientais das diferentes escalas, também podem variar com as mudanças ocasionadas pelas perturbações antrópicas (Pecher *et al.*, 2010; Wu e Legg, 2007).

As condições que caracterizam o hábitat resultam da interação entre a velocidade da corrente, tipo de substrato, as condições físicas e químicas da água, qualidade e quantidade de recursos alimentares disponíveis, entre outros fatores que podem sofrer alterações naturais ou antrópicas. Todos estes fatores interagem entre si ao longo do rio, criando um mosaico de microhábitats que abrigam comunidades biológicas distintas, definidas por adaptações morfológicas, hábitos alimentares, modos de locomoção e exigências fisiológicas (Sandin e Johnson, 2004). Os fatores que atuam em grande escala são responsáveis principalmente pela estrutura taxonômica das comunidades e os fatores em escala local influenciam primariamente a estrutura funcional (Heino *et al.*, 2007).

Os padrões de variabilidade espacial da comunidade de macroinvertebrados bentônicos na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil) permanecem ainda pouco conhecidos. Neste contexto, assume particular relevância a realização de análises consistentes que determinem suas escalas espaciais de variação como ferramenta para programas de monitoramento e ações de manejo e conservação. Assim, neste estudo analisou-se a variabilidade da comunidade de macroinvertebrados em três escalas espaciais, enfatizando quais escalas espaciais melhor explicam a estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos nesta bacia. Além disso, investigou-se quais os descritores ambientais mensurados influenciam na estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos e qual a porcentagem da variabilidade na riqueza de organismos pode ser explicada pelos descritores ambientais locais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Forqueta, RS (entre as latitudes 29°30' e 49'S e longitudes 52°00' e 53°45'W), objeto deste estudo, é uma sub-bacia da Bacia hidrográfica do rio Taquari (Figura 1).

Metodologia de amostragem

A coleta dos macroinvertebrados bentônicos seguiu um delineamento amostral hierárquico que abrangue diferentes escalas espaciais (entre mesohábitats, segmentos de rio e rios), amostrando assim, a escala local (mesohábitat), de segmento (ponto de amostragem) e a escala regional (rio). Para amostrar a escala regional foram selecionados três rios pertencentes à bacia do rio Forqueta (RS, Brasil): Arroio Forquetinha, Rio Fão e Rio Forqueta. Para a escala de segmento, 8 pontos de amostragem, formado por duas corredeiras e dois remansos consecutivos cada. Quanto à escala local, os mesohábitats: corredeira e remanso foram amostrados. Três réplicas foram coletadas em cada mesohábitat, totalizando 96 amostras.



Figura 1. Mapa da bacia do rio Forqueta, RS, apresentando a rede hidrográfica, com a localização dos oito pontos de amostragens analisados. Classificação da rede hidrográfica, segundo Strahler (1957).

Como critério de escolha dos pontos de amostragem (escala de segmento) foi considerado a presença de duas corredeiras e dois remansos consecutivos, facilidade de acesso ao local, além do estado de preservação. Os pontos foram primeiramente analisados pelo Protocolo de Avaliação do ambiente proposto por Callisto *et al.* (2002). Neste protocolo são avaliados 22 parâmetros, onde condições naturais recebem altos escores. O grau de conservação das áreas é baseado em informações do uso e ocupação da terra, incluindo observações relativas à cobertura vegetal, presença de poluentes no leito do rio, tipo de substrato, entre outros. As pontuações finais refletem o nível de preservação das condições ecológicas dos trechos amostrados, onde de 0 a 40 pontos representam trechos “impactados”; 41 a 60 pontos representam trechos “alterados” e acima de 61 pontos, trechos “naturais”. Todos os pontos de amostragem deste estudo apresentaram pontuação final acima de 66, sendo considerados “naturais”. Os valores obtidos no Protocolo ficaram entre 66 e 83.

Foi realizada amostragem da macrofauna bentônica no período de janeiro a fevereiro/2008 (verão - seco) em oito pontos de amostragem pré-selecionados (Figura

1). Ocorreram oito momentos de coleta, um para cada ponto. Durante as amostragens realizou-se coletas com amostragem semi-quantitativa a partir da utilização de amostrador Surber (malha: 250 μm ; área: 0,09 m^2) (Hauer e Lamberti, 1996). As coletas ocorreram na margem esquerda, centro e margem direita nas duas corredeiras e nos dois remansos pertencentes a cada ponto de amostragem, sendo obtido três amostras para cada corredeira e para cada remanso, totalizando 12 unidades amostrais em cada ponto (segmento de rio).

O material obtido foi acondicionado em recipientes e fixado em solução de formaldeído 4%. Posteriormente, foi corado com Rosa Bengala, numa concentração de 12 mg/l, a fim de facilitar a visualização dos organismos durante a triagem. Após, realizou-se triagem em peneira de malha 250 μm e estereomicroscópio, conservado em álcool 70%, identificado e quantificado. Para a identificação dos organismos coletados foi utilizado o nível de família, com o auxílio de chaves (McCafferty, 1981; Roldán-Pérez, 1988; Merrit e Cummins, 1996; Mugnai *et al.*, 2010).

Em cada ponto de amostragem foram obtidos os seguintes descritores ambientais: Largura do leito do rio (m), Temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) e Velocidade da corrente (m/s) e. Além disso, foram coletadas amostras de água a uma profundidade média de 20 cm, em frascos com preservantes adequados para as análises de: Alcalinidade (mg/L), Cloretos (mg/L), Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5 – mg/L), Demanda química de oxigênio (DQO – mg/L), Dureza total (mg/L), Fósforo total (mg/L), Nitratos (mg/L), Oxigênio dissolvido (mg/L), pH, Sólidos totais dissolvidos (mg/L) e Turbidez (UT). Posteriormente, foram transportados sob refrigeração, para o Laboratório de Unianálises do Centro Universitário UNIVATES, Instituição de Ensino Superior localizada em Lajeado, RS, a 10 km do ponto de amostragem 1. Para todas as análises citadas o laboratório utilizou protocolos padronizados. As principais características de cada segmento de rio (ponto de amostragem) estão apresentadas na tabela 1.

Análise dos dados

Para a análise da variação da comunidade de macroinvertebrados bentônicos em escalas espaciais, cada amostra representou um surber/réplica, totalizando 96 amostras neste estudo. Utilizou-se nas análises a riqueza rarefeita de cada unidade amostral, que foi obtida por intermédio de uma análise de rarefação (Gotelli e Colwell, 2001), utilizando o programa EstimateS 8.2 (Colwell, 2006). Esta análise utiliza a interpolação dos dados das amostras coletadas de menor valor a fim de evitar a incompatibilidade entre amostras que apresentam quantidades diferentes de indivíduos amostrados reduzindo assim os dados amostrados para um nível comum de abundância (Magurran, 2004).

A significância das diferenças na riqueza rarefeita dos organismos, nos diferentes níveis espaciais, foi determinada pela análise de variância hierárquica (*nested ANOVA*), com todos os fatores considerados randômicos. Este procedimento permite estimativas independentes das escalas com variabilidade significativa e dos componentes de variância em cada uma das escalas consideradas. A estimativa dos componentes de variância é um importante passo para a interpretação ecológica da Anova, pois permite avaliar a contribuição de um dado fator (neste caso, as diferentes escalas espaciais), para a variabilidade de uma variável resposta. Este modelo foi utilizado para verificar a variação espacial nas seguintes escalas: i) variação entre os rios, ii) entre os segmentos dentro de cada rio, iii) entre os mesohabitats dentro de segmento e rio. Esta análise foi realizada no programa Statistica 6.0 (StaSoft, 2001).

Tabela 1. Descritores ambientais dos oito locais de amostragem da bacia do rio Forqueta (RS, Brasil), no verão de 2008 (ver.). Legenda: Substrato predominante Tipo 1: cascalhos, areia e silte; Tipo 2: Matacões e seixos.

Descritores ambientais	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Localização (Arroio/Rio)	Forquetinha	Forqueta	Forquetinha	Fão	Fão	Fão	Forqueta	Forqueta
Ordem do rio	5 ^a	6 ^a	1 ^a	5 ^a	2 ^a	1 ^a	5 ^a	2 ^a
Substrato predominante	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2
Atividade agrícola	presente	presente	presente	presente	ausente	ausente	ausente	presente
Alcalinidade (mg/l)	39,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	19,9
Cloretos (mg/l)	2,91	1,94	1,94	1,46	1,94	1,46	1,46	0,48
Condutividade (µS/cm)	69,5	40,2	40,9	63,9	40,9	23,3	27,5	49,6
DBO₅ (mg/l)	2,4	2,6	2,2	1,7	1,8	2,4	4,0	3,1
DQO (mg/l)	2,9	2,9	3,2	2,1	2,5	4,8	5,7	4,1
Dureza (mg/l)	28	16	16	18	22	12	10	16
Fósforo total (mg/l)	0,02	0,02	0,02	0,08	0,02	0,03	0,06	0,09
Largura do rio (m)	14,5	2,14	9,6	3,47	3,5	2,47	4,59	3,17
Nitratos (mg/l)	0,14	0,06	0,17	0,45	0,31	0,14	0,23	0,39
O₂ dissolvido (mg/l)	9,56	8,20	9,02	8,6	8,7	6,2	7,7	8,26
pH	7,61	7,78	7,84	7,36	8,59	7,43	7,83	7,79
Sólidos totais (mg/l)	41	23	23	34,4	23	16	18	26
Temperatura da água °C	26,2	29,1	23,7	20	30,6	22,1	21,8	22,4
Turbidez (UT)	3,44	6,19	4,62	8,87	5,32	4,35	5,34	5,47
Vel. corrente (m/s)	2,4	1,7	7,4	4,2	2,5	1,3	2,8	7,2

Para visualizar os padrões de semelhança na estrutura das associações macrobentônicas entre as escalas espaciais adotadas, foi realizada análise de proximidade nMDS (*non metric multidimensional scaling*) a partir da matriz de dissimilaridade de Bray-Curtis (Krebs, 1999). Essa análise foi utilizada para verificar se as comunidades estão estruturadas conforme o tipo de rio, segmento ou mesohábitat. Como medida da representatividade da matriz foi utilizada a estatística denominada “stress”, sendo que valores abaixo de 0,2 correspondem a um ajuste regular e valores abaixo de 0,1, um ajuste bom da ordenação (Clarke e Warwick, 2001). Esta análise foi realizada no programa PAST 2.05 (Hammer *et al.*, 2001).

Para analisar se há variação da estrutura da comunidade de macroinvertebrados, considerando a escala hierárquica (diferenças entre rios, segmentos dentro de rios e mesohabitats dentro dos segmentos de rios) foi utilizada a análise de variância multivariada permutacional (não-paramétrica) para modelos com múltiplos fatores (Permanova). Um fator foi considerado fixo e cruzado e os níveis hierárquicos inferiores, segmentos de rio e mesohabitats foram considerados aleatórios e aninhados. Utilizou-se a matriz de riqueza rarefeita e as diferenças entre as escalas foram baseadas na dissimilaridade de Bray-Curtis, com 999 permutações. Esta análise foi realizada no programa PERMANOVA 1.6 (Anderson, 2005).

A Análise de Redundância parcial (pRDA) que combina ordenação e regressão linear múltipla foi usada para verificar a influência dos descritores ambientais sobre as comunidades de macroinvertebrados bentônicos. Esta é uma análise de ordenação canônica de gradiente direto, pressupondo respostas lineares da abundância dos gêneros ao longo dos gradientes ambientais (Legendre e Legendre, 1998). Foi realizada devido ao caráter espacial das amostras, ou seja, devido à falta de independência estatística das amostras obtidas ao longo do espaço geográfico, também chamada autocorrelação espacial. Assim, uma matriz geográfica (matriz espacial) foi usada para remover o efeito da autocorrelação espacial dos dados, bem como verificar a importância da posição geográfica dos rios nas comunidades de macroinvertebrados bentônicos estudadas.

Assim, na análise foram utilizadas a matriz de abundância de famílias, matriz com os descritores ambientais e a matriz geográfica como covariável. Em seguida, para avaliar isoladamente a importância dos descritores ambientais e da matriz geográfica, foi realizada a partilha da variância, conforme Borcard *et al.* (1992). A variância encontrada na abundância das comunidades foi particionada em variância explicada: a) pelos descritores ambientais, b) descritores ambientais indissociáveis da posição geográfica, c) pela porção puramente geográfica e d) pela variação inexplicada, ou seja, não explicada pelos descritores ambientais e nem pela matriz geográfica.

A matriz dos dados bióticos foi transformada (raiz quadrada), medida adotada para normalizar e tornar os dados homoscedásticos (Sokal e Rohlf, 1995). Os dados ambientais também foram transformados e depois padronizados pelo desvio padrão. A significância estatística dos eixos de ordenação e dos descritores ambientais foi avaliada pelo teste de permutação de Monte Carlo (999 aleatorizações) para modelos com covariável. A pRDA foi realizada no programa CANOCO 4.5 (Ter Braak e Smilauer, 2002).

RESULTADOS

Foram coletados 5.949 indivíduos, distribuídos em 23 famílias de macroinvertebrados bentônicos nos mesohabitats: remanso e corredeira em oito pontos de amostragem pertencentes aos rios Forqueta, Fão e Arroio Forquetinha, além de seus afluentes, no verão de 2008 (Tabela 2).

A análise de variância para modelos hierárquicos (nested ANOVA) mostrou variação significativa na riqueza rarefeita entre os mesohabitats (Tab. 3). De acordo com a nested Anova, a variação na riqueza devido às diferenças entre os rios foi zero, enquanto 8% foi explicada pela diferença entre os segmentos e 46,5% de toda a variação foi explicada pelas diferenças entre os mesohabitats e 45,5% pelo resíduo. O resíduo consiste na variação entre as réplicas de um mesmo mesohabitat (entre cada surber).

Tabela 2- Composição, abundância e riqueza de macroinvertebrados bentônicos coletados em oito pontos de amostragem nos mesohabitats remanso e corredeira na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil), verão de 2008 (rem. = remanso, cor. = corredeira).

Arroio/rio	Forquetinha		Forqueta		Forquetinha		Fão		Fão		Fão		Forqueta		Forqueta	
Segmentos	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7		P8	
Mesohábitats	rem.	cor.	rem.	cor.	rem.	cor.	rem.	cor.	rem.	cor.	rem.	cor.	rem.	cor.	rem.	cor.
EPHEMEROPTERA																
Baetidae	0	17	9	16	5	18	25	75	4	38	63	142	0	45	10	18
Caenidae	40	223	0	17	16	28	28	14	9	67	5	0	20	71	16	33
Leptophlebiidae	0	6	1	15	0	10	11	21	0	24	56	159	0	51	0	0
PLECOPTERA																
Gripopterygidae	0	2	0	0	0	0	0	28	0	0	0	3	0	38	0	0
Perlidae	7	64	0	5	0	0	15	127	1	59	42	125	0	50	1	26
TRICHOPTERA																
Hydropsychidae	28	234	30	63	11	64	23	48	3	80	0	0	1	11	13	162
Philopotamidae	6	161	0	20	24	29	0	25	16	17	0	0	6	0	6	50
ODONATA																
Coenagrionidae	43	46	6	0	2	12	13	2	0	8	0	3	3	10	3	11
Libellulidae	3	37	0	13	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0
DIPTERA																
Ceratopogonidae	0	4	0	0	19	17	0	1	8	9	0	2	8	0	77	40
Chironomidae	33	49	9	20	23	140	9	36	23	51	14	0	128	126	201	386
Simuliidae	14	68	3	5	5	80	3	0	0	6	0	0	0	129	12	90
Tipulidae	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
COLEOPTERA																
Elmidae	11	67	0	1	0	9	0	24	0	30	0	0	0	12	4	3
Hydrophilidae	6	146	1	1	0	6	10	4	4	25	0	0	0	9	8	50
Psephenidae	0	0	0	0	0	0	5	8	0	0	6	0	21	0	4	0
HEMIPTERA																
Gerridae	2	4	2	1	8	4	0	2	0	5	0	3	0	1	2	5
Naucoridae	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
MEGALOPTERA																
Corydalidae	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0
LEPIDOPTERA																
Pyralidae	20	32	1	7	0	0	0	2	0	22	0	0	1	10	10	13
CRUSTACEA																
Aeglidae	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0
MOLLUSCA																
GASTROPODA																
Hydrobiidae	0	0	0	0	0	11	0	48	0	0	0	0	0	0	8	0
OLIGOCHAETA																
Tubificidae	0	0	15	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ABUNDÂNCIA	213	1163	77	184	119	429	143	468	68	442	186	438	188	568	376	887
RIQUEZA																
OBSERVADA	12	17	10	13	10	14	11	18	8	15	6	8	8	16	16	13
RIQUEZA																
RAREFEITA	10,9	12,3	9,6	9	9,8	11,5	10,3	12,4	8,0	8	5,8	4,6	6,4	11,3	11,1	10,3

Tabela 3- Resultados da análise de componentes de variância (nested ANOVA) para riqueza rarefeita de macroinvertebrados bentônicos em três escalas espaciais, entre rios, segmentos dentro de rios, mesohabitats dentro de segmentos e rios. Legenda: gl = graus de liberdade, QM = quadrado médio, F = valor do teste, $p < 0,05$, CV = componentes de variância (em %).

	gl	QM	F	p	CV (%)
Rio	2	0,49	1,0	0,47	0
Segmento (rio)	11	28,76	11,47	0,65	8
Mesohabitat (Segmento (rio))	32	32,38	0,93	< 0,0001	46,5
Resíduo	127				45,5

A análise de proximidade nMDS (*non metric multidimensional scaling*) a partir da matriz de dissimilaridade de Bray-Curtis evidenciou tendência de segregação das amostras de mesmo habitat, independente do segmento e rio (Fig. 2). Essa tendência foi confirmada pela análise de variância multivariada (Permanova) que evidenciou variação significativa da estrutura das comunidades entre os mesohabitats: corredeira e remanso. A maior estimativa de variância (quadrado médio) foi encontrada entre os mesohabitats, o que indica maior variação da estrutura espacial das comunidades de macroinvertebrados nessa escala (Tab. 4).

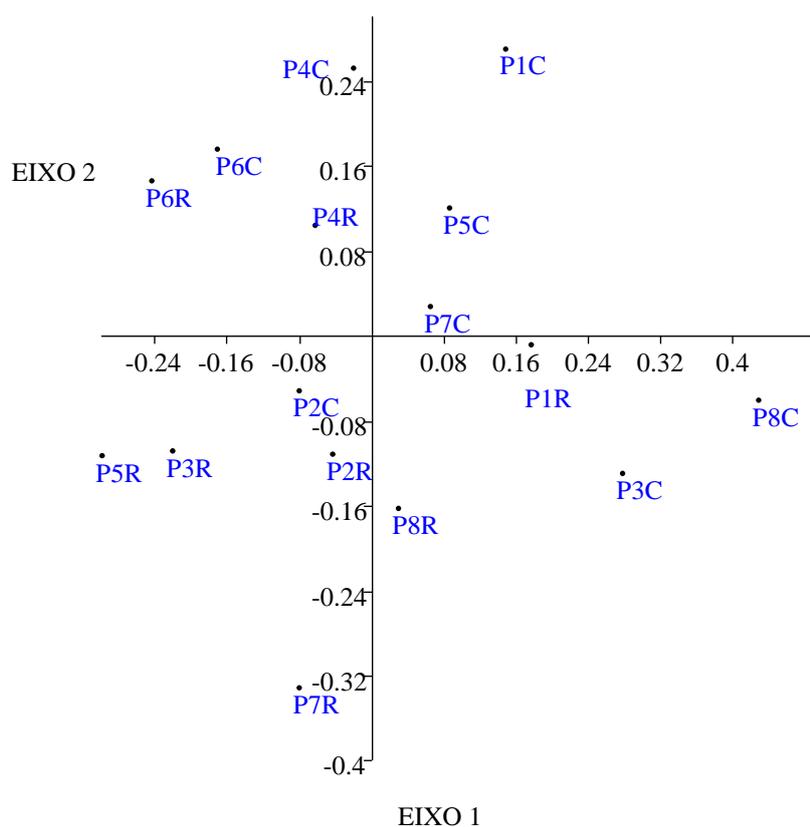


Figura 2. Ordenação da similaridade de Bray-Curtis pelo método de escalonamento multidimensional não-métrico (nMDS) para as amostras de macroinvertebrados bentônicos coletados no verão de 2008 na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil). Legenda: R = remanso, C = corredeira, 1 a 8 segmentos amostrados. Stress = 0,177.

Tabela 4 - Resultados da análise de variância multivariada permutacional (permanova) para a estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos em três escalas espaciais, entre rios, segmentos dentro de rios, mesohabitats dentro de segmentos e rios. Legenda: gl = graus de liberdade, QM = quadrado médio, F = valor do teste, $p < 0,05$.

	gl	QM	F	p
Rio	2	1.392	1,38	0,19
Segmento (rio)	11	2.876	3,53	0,21
Mesohabitat (Segmento (rio))	32	3.281	1,94	< 0,0001
Resíduo	127	658		

Os resultados da Análise de Redundância parcial (pRDA) mostraram que a variância total dos dados (inércia) foi de 0,587, desta os dois primeiros eixos explicaram 22,1% da variação existente nos dados de abundância das comunidades de macroinvertebrados bentônicos. Os descritores ambientais analisados explicaram 73,7% da relação espécie-ambiente, considerando os dois primeiros eixos (Tab. 5). Os testes de Monte Carlo evidenciaram que o primeiro eixo da ordenação foi significativo ($F = 2,77$, $p = 0,02$), e também os quatro eixos de forma conjunta ($F = 1,22$, $p = 0,01$).

Tabela 5 - Autovalores, correlação espécie/ambiente e porcentagem cumulativa da variância explicada nos três eixos da Análise de Redundância parcial (pRDA) para as comunidades de macroinvertebrados bentônicos e para os descritores ambientais estudados na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil), amostrados no verão de 2008.

	Eixo I	Eixo II	Eixo III	Inércia total
Autovalores	0,052	0,022	0,012	1,000
Correlação espécie-ambiente	0,739	0,701	0,722	
Porcentagem da variância cumulativa:				
dos dados de espécie	17,3	22,1	26,8	
da relação espécie-ambiente	51,6	73,7	79,3	
Soma total dos autovalores				0,587
Soma total dos autovalores canônicos				0,125

Na pRDA, os descritores ambientais nitratos, sólidos totais dissolvidos, condutividade, oxigênio dissolvido, DQO, DBO, fósforo total, largura do leito e velocidade da corrente foram correlacionados positivamente e cloretos, dureza, temperatura da água, pH, alcalinidade e turbidez foram correlacionados negativamente com o primeiro eixo de ordenação (Tab. 6 e Fig. 3).

Tabela 6 - Correlações inter-set dos dois primeiros eixos da Análise de Redundância parcial (pRDA) com os descritores ambientais registradas na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil), amostrados no verão de 2008.

	Eixo I	Eixo II
Alcalinidade	-3,2	-4,1
Cloretos	-0,8	3,2
Condutividade	2,1	1,8
DBO	0,3	-5,2
DQO	1,8	-3,1
Dureza	-2,6	2,8
Fósforo	-1,2	-0,2
Largura do leito	4,5	0,7
Nitratos	2,7	4,8
Oxigênio dissolvido	1,8	2,2
pH	-8,3	3,7
Sólidos totais dissolvidos	2,5	4,6
Temperatura da água	-3,1	2,6
Turbidez	-2,4	-3,2
Velocidade da corrente	4,2	-2,1

O primeiro eixo da pRDA separou o rio Fão (pontos 4, 5 e 6) da maioria dos demais pontos. É possível observar a separação entre os mesohabitats corredeira e remanso.

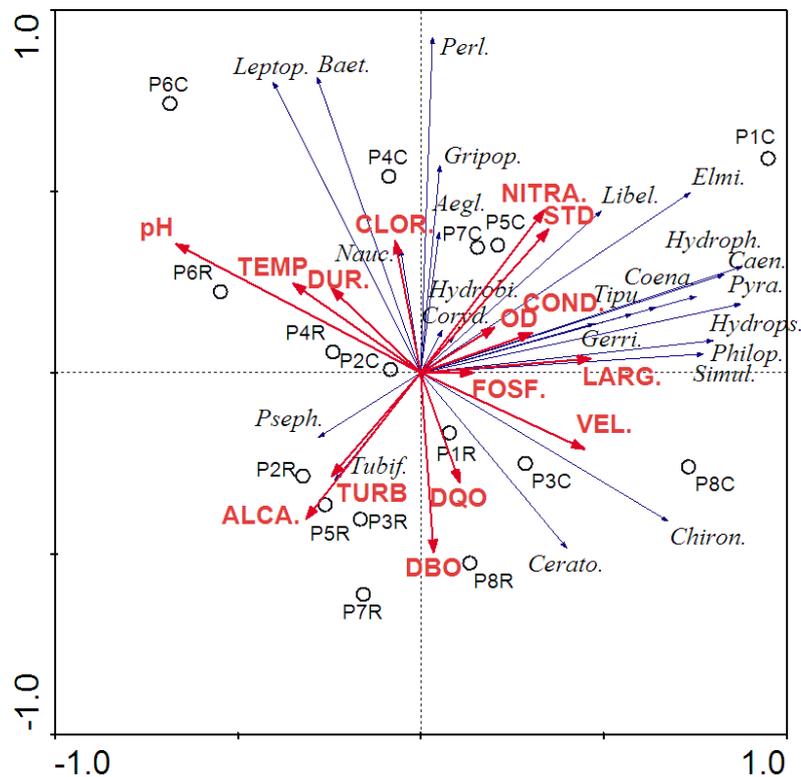


Figura 3. Diagrama de ordenação dos dois primeiros eixos da Análise de Redundância parcial (pRDA) para os descritores ambientais, famílias de macroinvertebrados bentônicos coletados em oito pontos de amostragem (segmentos de rio) na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil), verão de 2008. Legenda: P1 a P8 = pontos de amostragem. R = remanso e C = corredeira. Baet = Baetidae; Caen = Caenidae; Leptop = Leptophlebiidae; Gripop = Gripopterygidae; Perl = Perlidae; Hydroph = Hydropsychidae; Philop = Philopotamidae; Coena = Coenagrionidae; Libel = Libellulidae; Cerato = Ceratopogonidae; Chiron = Chironomidae; Simul = Simullidae; Elm = Elmidae; Hydroph = Hydrophillidae; Pseph = Psephenidae; Nauc = Naucoridae; Gerri = Gerridae; Hydrobi = Hydrobiidae; Aegl = Aegidae; PYra = Pyralidae, Tipu = Tipulidae, Coryd = Corydalidae.

A partilha da variância da estrutura das comunidades de macroinvertebrados bentônicos evidenciou que 12,5% da variabilidade dos dados foram explicados pelos descritores ambientais locais inseridas no modelo, 6,7% foram explicados pelos descritores ambientais indissociáveis da posição geográfica, 29,2% foram explicados pela posição geográfica dos rios. Assim, 48,4% da variabilidade da estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos foram explicados pelo modelo utilizado e 51,6% da variância foi considerada inexplicada (Fig. 4).

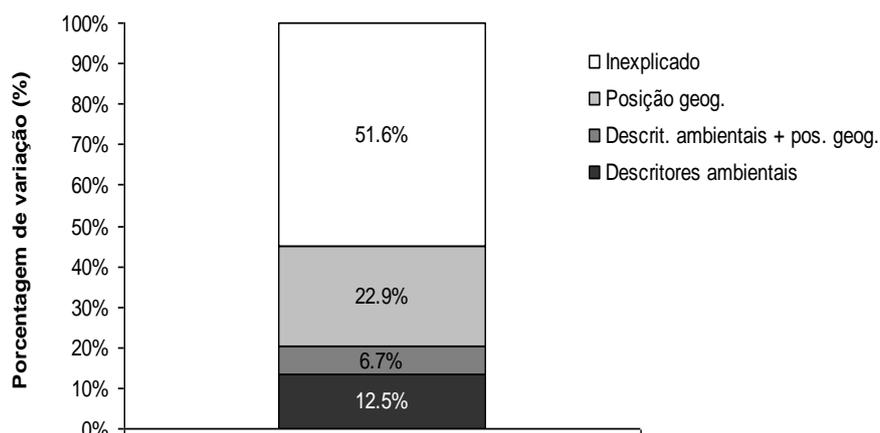


Figura 4. Partilha da variância da explicabilidade da estrutura das comunidades de macroinvertebrados bentônicos obtidos pela Análise de Redundância parcial (pRDA), considerando os descritores ambientais e a matriz geográfica para as famílias de macroinvertebrados bentônicos coletados na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil) no verão de 2008.

DISCUSSÃO

Os rios são ambientes extremamente heterogêneos, estudos recentes têm demonstrado que os organismos ali presentes respondem a esta heterogeneidade, apresentando variabilidade na estrutura da comunidade em múltiplas escalas espaciais (Heino *et al.*, 2004, 2007; Li *et al.*, 2001; Lecraw e Mackereth, 2010). Esta variabilidade em múltiplas escalas também foi observada no presente estudo, segundo a nested Anova, observou-se variação na estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos considerando múltiplas escalas espaciais (mesohábitat, segmento de rio e rio).

O modelo amostral hierárquico forneceu evidências de que a riqueza da comunidade de macroinvertebrados bentônicos na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil) é determinada pelos descritores ambientais locais, pois foi possível observar variação significativa entre os mesohabitats: corredeira e remanso. Observou-se tendência de estruturação da comunidade de macroinvertebrados bentônicos conforme o tipo de mesohábitat. Isto foi observado pela ordenação (nMDS) e corroborada pela análise de variância multivariada (Permanova). As características de mesohábitat têm forte associação com a comunidade de invertebrados, destaca-se a importância de características específicas do hábitat tais como o tipo de substrato, velocidade da corrente, temperatura da água entre outros (Roque e Trivinho-Strixino, 2001; Lecraw e Mackereth, 2010).

A variação da riqueza entre os mesohabitats corrobora o encontrado em diversos trabalhos que encontraram diferente riqueza entre corredeira e remanso e entre tipos de substratos (Pardo e Armitage, 1997; Buss *et al.*, 2004; Robson *et al.*, 2005; Costa e Melo, 2008). Muitos estudos mostram que substratos associados a corredeiras são os mais diversos, quando comparados com remansos (Buss *et al.*, 2004; Silveira *et al.*, 2006). A maior riqueza encontrada nas corredeiras possivelmente está associada às características físicas do substrato, como maior estabilidade e complexidade estrutural (Downes *et al.*, 1995; Beisel *et al.*, 1998).

Roque e Trivinho-Strixino (2001) encontraram maior riqueza de fauna nas corredeiras, o que segundo os autores, sugere que a heterogeneidade de substrato, a

maior velocidade da água e maior concentração de oxigênio dissolvido, característicos de corredeiras, sejam fatores importantes para a manutenção de maior riqueza nestas áreas. Trabalharam com amostragens em nível de diferentes mesohabitats. Mostraram haver diferenças na estrutura taxocenótica e funcional dos macroinvertebrados com inter-relação entre as características físicas e químicas do ambiente e a distribuição dos organismos, demonstrando a importância de variações no mesohabitat para o estudo da distribuição dos macroinvertebrados em ambientes lóticos.

Beisel *et al.* (2000), trabalhando com rios na França, analisaram a influência das características do mesohabitat em relação à escala espacial. Observaram que as tendências na estrutura da comunidade mostraram-se relacionadas à variabilidade espacial dos mesohabitats analisados. Identificaram a heterogeneidade deste como fator potencialmente importante para explicar ou prever os padrões de distribuição dos invertebrados. Concluíram, que a diversidade faunal foi mais alta em mesohabitats mais complexos e heterogêneos.

Vários estudos que abrangem múltiplas escalas têm mostrado que a fauna é estruturada conforme o tipo de mesohabitat, ou seja, as amostras do mesmo tipo de habitat são mais similares entre si, independente do rio e de áreas próximas (Costa e Melo, 2008). Neste estudo, os resultados obtidos mostram que a estrutura espacial da comunidade de macrobentos é predita pelos fatores ambientais da escala local ligada ao mesohabitat.

Além disso, outra grande fonte de variação na riqueza, obtida na nested Anova, foi encontrada entre as réplicas (surber) de um mesmo habitat. Estes resultados sugerem que nesta bacia não seja necessário amostrar vários segmentos de rio ou rios a fim de obter uma avaliação eficiente da diversidade regional, mas deve-se enfatizar a necessidade várias réplicas. Isto é relevante tratando-se de programas de biomonitoramento, principalmente.

Para Beisel *et al.* (1998), os fatores que determinam a variação em pequena escala (entre mesohabitats) na estrutura da comunidade dos rios são: os fatores físicos (advindos da topografia e da hidrodinâmica) e químicos, suprimento alimentar, reprodução e as interações ecológicas. Acredita-se que destes, os fatores físicos e químicos sejam mais atuantes.

A bacia do rio Forqueta, de forma geral, apresentou qualidade satisfatória, evidenciando uma capacidade de degradação de poluentes advindos de atividades antrópicas (despejo de lixo doméstico, esgoto e atividades agrícolas), sendo mais preocupantes os resíduos de atividades agrícolas; porém, é bem possível que, se o ritmo de poluição perdurar, ou pior, se intensificar, tal capacidade seja prejudicada, afetando a diversidade não só de macroinvertebrados bentônicos, mas de toda a biota, uma vez que os organismos se inter-relacionam através de teias tróficas, e qualquer nível trófico perturbado desencadeia respostas estressoras para o restante da estrutura trófica.

Neste estudo encontrou-se similaridade na estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos entre os três rios analisados, os quais mostraram-se muito semelhantes quanto aos descritores ambientais mensurados, diferentemente foi encontrado por Ligeiro *et al.* (2010) que trabalhou com rios de condições ambientais também semelhantes. Isto provavelmente deve-se ao fato de que haja outro mecanismo responsável pela diferença na composição faunística, como a restrição na dispersão de adultos (Finn e Poff, 2005), o que não foi encontrado no presente estudo, visto a similaridade apresentada.

A relativa similaridade na composição faunística observada entre os segmentos de rio, confirmam o encontrado por outros estudos (Robson e Chester, 1999; Ciesielka e Bailey, 2007). Outros estudos têm demonstrado a grande diferença entre os segmentos e

até mesmo entre as corredeiras (Downes *et al.*, 2000; Heino *et al.*, 2004; 2005). Esta controvérsia pode ser devida à distância entre os pontos analisados, pois trechos mais próximos, mostram-se mais similares (Ligeiro *et al.*, 2010). Mesmo locais que apresentam características físicas e químicas diferentes podem apresentar fauna de macrobentos semelhante, sendo fatores em múltiplas escalas que denotam a estrutura da comunidade (Ramírez *et al.*, 2006). A determinação da relevância de um ou mais descritores ambientais é um importante auxílio na explicação dos padrões de distribuição das associações macrobentônicas. A agregação dos organismos em pequena escala pode ser uma resposta da macrofauna a pequenas variações espaciais nas propriedades dos sedimentos.

A análise de Redundância parcial (pRDA) evidenciou correlação entre os descritores ambientais mensurados e a estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil). A partilha da variância analisada neste estudo mostrou que uma pequena porção da variabilidade na estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos foi explicada puramente pelos descritores ambientais, ou seja, 12,5% da variação na abundância foi explicada pelos fatores ambientais que apresentaram correlação com o primeiro eixo da pRDA (condutividade, nitratos, sólidos totais dissolvidos, oxigênio dissolvido, DBO, DQO, fósforo total, largura do leito do rio e velocidade da corrente). A análise evidenciou que uma porção da variabilidade dos dados também foi explicada puramente pela posição geográfica dos rios (22,9%), indicando que existe certa estruturação espacial da comunidade, também chamada de autocorrelação espacial. Este resultado foi corroborado pela correlação significativa entre a matriz de similaridade faunística e a distância geográfica. Em termos gerais, a existência desta estruturação espacial das comunidades é devido a algum processo biológico contagioso, como predação, reprodução e dispersão, sem relação com os descritores ambientais (Borcard e Drapeau, 1992). Assim, a porção explicada pela matriz geográfica demonstra que os rios mais próximos geograficamente e com conectividade direta entre si, ou seja, de uma mesma área possuem maior similaridade na estrutura das comunidades, possivelmente ocasionada pela capacidade de colonização e de dispersão da fauna.

A partilha da variância evidenciou que 51,6% da variabilidade da estrutura da comunidade permaneceram inexplicadas. Isto deve-se principalmente ao fato de que grande parte desta variância é devido a outras fontes de variabilidade, como descritores ambientais não medidos ou estruturas espaciais que foram perdidas por exigir funções mais complexas para serem descritas. Neste estudo, a grande porção da variância inexplicada, parece indicar que outras fontes de variabilidade, como descritores ambientais não mensuradas, são importantes para a organização das comunidades de macroinvertebrados bentônicos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos diversos estudos abordando o padrão de organização das comunidades de macrobentos, ainda há muita controvérsia sobre a importância e o peso dos descritores ambientais locais, regionais e da posição geográfica dos rios (Sandin e Johnson, 2004). Muitos estudos têm mostrado que os descritores ambientais locais são os fatores primariamente determinantes da estrutura das comunidades (Poff, 1997). Outros, têm salientado a importância de considerar também os descritores ambientais regionais e a posição geográfica dos rios nos modelos ecológicos (Sandin e Johnson, 2004).

No presente estudo, embora grande porção da variabilidade na abundância das famílias permaneceu inexplicada, os resultados aqui encontrados destacam a contribuição semelhante dos descritores ambientais locais e da posição geográfica dos rios na estruturação das comunidades. Esses resultados evidenciaram que além dos descritores ambientais locais, os processos biológicos, como dispersão, também influenciaram as comunidades de macroinvertebrados na bacia do rio Forqueta (RS, Brasil).

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Universitário UNIVATES pelo apoio financeiro. Ao pessoal do Museu de Ciências Naturais da UNIVATES pela elaboração dos mapas, em especial ao Biólogo Rafael Rodrigo Eckardt. Aos bolsistas do Centro Universitário UNIVATES: Adriani Muller, Daiana Bald, Eduardo Martins de Souza e Úrsula Arend pelo auxílio nas atividades de campo. Ao PPG Ecologia – UFRGS.

REFERÊNCIAS

- BONGERS, F., POPMA, J., MEAVE, J.; CARABIAS, J. 1988. Structure and floristic composition of the lowland rain forest of Los Tuxtlas, Mexico. **Vegetatio** 74: 55-80.
- BONADA, N.; RERADEVALL, M.; DALLAS, H.; DAVIS, J.; DAY, J.; FIGUEROA, R.; RESH, V. H.; PRAT, N. 2008. Multi-scale assessment of macroinvertebrate richness and composition in Mediterranean-climate rivers. **Freshwater Biology** 53: 772-788.
- HAMMER, O., HARPER, D.A.T; RYAN, P.D. 2001. **PAST**: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4 (1): http://palaeoelectronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm (último acesso em 07/fev./2010).
- LECRAW, R.; MACKERETH, R. 2010. Sources of small-scale variation in the invertebrate communities of headwater streams. **Freshwater Biology** 55: 1219-1233.
- LIGEIRO, R.; MELO, A.S.; CALLISTO, M. 2010. Spatial scale and the diversity of macroinvertebrates in a Neotropical catchment. **Freshwater Biology** 55: 424-435.
- PECHER, C.; FRITZ, S. A.; MARINI, L.; FONTANETO, D.; PAUTASSO, M. 2010. Scale-dependence of the correlation between human population and the species richness of stream macro-invertebrates. **Basic and Applied Ecology** 11: 272-280.
- FINN, D.S.; POFF, N.L. 2005. Variability and convergence in benthic communities along the longitudinal gradients of four physically similar Rocky Mountain streams. **Freshwater Biology** 50: 243-261.
- HEINO, J.; MYKRÄ, H.; KOTANEN, J.; MUOTKA, T. 2007. Ecological filters and variability in stream macroinvertebrate communities: do taxonomic and functional structure follow the same path? **Ecography** 30: 217-230.

RAMÍREZ, A.; PRINGLE, C.M.; DOUGLAS, M. 2006. Temporal e spatial patterns in stream physicochemistry and insect assemblages in tropical lowland streams. *J.N. American Benthological Society* 25 (1): 108-125.

ROQUE, F. O.; TRIVINHO-STRIXINO, S. 2001. Benthic macroinvertebrates in mesohabitats of different spatial dimensions in a first order stream (São Carlos – SP). *Acta Limnologica Brasiliensia* 13(2): 69-77.