

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Campus UFRJ-Macaé Professor Aloísio Teixeira

EFEITO DO BIORREVOLVIMENTO POR *HELEOBIA*  
*AUSTRALIS* (D'ORBIGNY, 1835) (GASTROPODA) E *LAONEREIS*  
*CULVERI* (WEBSTER, 1880) (POLYCHAETA) SOBRE OS FLUXOS DE  
CARBONO INORGÂNICO NAS INTERFACES SEDIMENTO-ÁGUA-  
ATMOSFERA

Danieli Flavia Rossi

2013



EFEITO DO BIORREVOLVIMENTO POR *HELEOBIA AUSTRALIS* (D'ORBIGNY, 1835) (GASTROPODA) E *LAONEREIS CULVERI* (WEBSTER, 1880) (POLYCHAETA) SOBRE OS FLUXOS DE CARBONO INORGÂNICO NAS INTERFACES SEDIMENTO-ÁGUA-ATMOSFERA

Danieli Flavia Rossi

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Conservação, Campus UFRJ-Macaé Professor Aloísio Teixeira, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Co-orientador: Prof. Dr. Vinicius Fortes Farjalla

Macaé

Julho/2013

EFEITO DO BIORREVOLVIMENTO POR *HELEOBIA*  
*AUSTRALIS* (D'ORBIGNY, 1835) (GASTROPODA) E *LAONEREIS*  
*CULVERI* (WEBSTER, 1880) (POLYCHAETA) SOBRE OS FLUXOS DE  
CARBONO INORGÂNICO NAS INTERFACES SEDIMENTO-ÁGUA-  
ATMOSFERA

Danieli Flavia Rossi

Orientador: Prof. Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Co-orientador: Prof. Dr. Vinicius Fortes Farjalla

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Conservação, Campus UFRJ-Macaé Professor Aloísio Teixeira, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Aprovada por:

---

Presidente, Prof. Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

---

Prof. Dr. José Nepomuceno

---

Prof. Dr. Maurício Mussi

Macaé

Julho/2013

**FICHA CATALOGRÁFICA**

Rossi, Danieli Flavia

Efeito do biorrevolvimento por *Heleobia australis* (d'Orbigny, 1835) (Gastropoda) e *Laeonereis culveri* (Webster, 1880) (Polychaeta) sobre os fluxos de carbono inorgânico nas interfaces sedimento-água-atmosfera/ Danieli Flavia Rossi. Macaé: UFRJ/Macaé Prof. Aloísio Teixeira, 2013.

xiii, 47f.; il.

Orientador: Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ Macaé/ Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação, 2013.

Referências Bibliográficas: f. 41-47.

1. Biorrevolvimento. 2. Respiração. 3. Macroinvertebrados Bentônicos. 4. CO<sub>2</sub>. I. Barros, Marcos Paulo Figueiredo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus – Macaé Prof. Aloísio Teixeira, Macaé, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Conservação. III. Efeito do biorrevolvimento por *Heleobia australis* (d'Orbigny, 1835) (Gastropoda) e *Laeonereis culveri* (Webster, 1880) (Polychaeta) sobre os fluxos de carbono inorgânico nas interfaces sedimento-água-atmosfera.

Dedico essa dissertação à minha família por todo amor, apoio, incentivo e confiança.

Aos meus pais, Domingos e Maria José, e irmãs, Drieli e Dayani.

Obrigada por tudo, vocês são minha base e meu maior tesouro!

## AGRADECIMENTOS

A conquista desse título requer muitos esforços, dificuldades e renúncias. Considero essa fase como a mais difícil em toda a minha vida, mas, sobretudo a de maior aprendizado. Em cada página deste documento recordo-me de momentos vividos, com a participação de muitos em cada situação enfrentada ao longo do mestrado.

Começo por Ele... a **Deus** que permitiu e conduziu este momento sempre me dando forças nos momentos mais difíceis que encontrei por aqui, e não foram poucos.

Ao meu orientador **Marcos Paulo**, só dizer obrigada é pouco! Durante o mestrado foi um profissional impecável, disposto a ajudar sempre que precisei, além de ser um grande amigo. Obrigada por sempre me animar diante dos meus dados, mostrando a melhor maneira de interpretá-los. Agradeço principalmente o apoio, compreensão e paciência diante das minhas dificuldades e problemas nesses últimos meses. Tenho total certeza que sem a sua colaboração eu não teria finalizado esta pesquisa.

Aos meus pais, **Domingos** e **Maria José**, que além do apoio financeiro quando precisei, sempre incentivaram com palavras de conforto e apoio que por incrível que pareça, chegavam na hora certa. Às minhas irmãs **Drieli** e **Dayani** (extensivo aos cunhados **Emerson** e **Murilo**) que a cada dia que passa se tornam exemplos de amizade e companheirismo. Obrigada por estarem do meu lado sempre! Amo vocês! A família é enorme e sei que todos sempre torceram, mesmo à distância. Aos meus avós, aos numerosos tios e primos, agradeço as orações, energias positivas, amizade, torcida e companheirismo. Em especial, **Tia Wylma** e **Rafael**, muito obrigada por todo amor, apoio, preocupação e torcida. Vocês valem ouro, fazem parte de mim, do que sou e não abro mão da nossa relação sincera por nada!

Agradeço a todo grupo do **Laboratório de Limnologia**, talvez eu não tenha contribuído tanto quanto eu aprendi, mas a experiência foi valorosa. Aprendi e amadureci muito em pouco tempo. Aos professores **Vinicius Fortes Farjalla**, **Reinaldo Bozelli**, **Francisco Esteves**, **João José Leal** e **Marcos Paulo** que orientam essa grande e talentosa equipe, devo-lhes parabenizar e agradecer pelo exemplo de profissionalismo. O amor que vocês dedicam no desempenho das pesquisas no nosso grupo é admirável. **Professor Vinicius**, obrigada pela co-orientação, agradeço-lhe ainda a valiosíssima oportunidade de participar da excursão do Pronex, foi uma experiência incrível. Além de poder conhecer os imensos rios e lagos da Amazônia, nosso “escritório”, aprendi bastante com a equipe de excelência que estava participando. **Professor Reinaldo**, obrigada por disponibilizar a bolsa do mestrado através do Projeto Carajás, a ajuda financeira facilitou muito minha permanência em Macaé durante esse

período. Agradeço também toda atenção, carinho e apoio sempre que tivemos a oportunidade de nos encontrar. Ao **Professor João Leal** agradeço a parceria, amizade e ensinamentos, principalmente durante a campanha em Trombetas, obrigada pela oportunidade e confiança.

Ao querido amigo **Vinicius Scofield** (Wilsinho), obrigada pela essencial contribuição e ajuda durante a pesquisa. Você foi fundamental para o desenho experimental do trabalho, me deu todo o suporte durante os experimentos, minimizando os efeitos da minha inexperiência e a ausência do meu orientador. Agradeço ainda a você e a **Aliny** a ajuda com o manuseio do picoamperímetro. Admiro a dedicação, inteligência e profissionalismo dos dois, vocês vão longe e terão um futuro brilhante!

Agradeço aos professores do NUPEM pela formação. Gostaria de agradecer em especial à professora **Ana Petry**, que além de ser excelente em tudo que faz e ter me direcionado na estatística dos dados, sempre foi uma mãezona se preocupando e torcendo por todos. Aos professores **Maurício Mussi**, **Christine Ruta** e **José Nepomuceno**, agradeço as relevantes contribuições ao trabalho durante o exame de qualificação. Agradeço aos professores **José Nepomuceno** e **Maurício Mussi** o interesse e disponibilidade para compor a banca examinadora. Tenho a certeza que irão contribuir ainda mais para a melhoria do trabalho.

Aos amigos de longe que sempre incentivaram e torceram apesar da ausência durante esse tempo: **Marco Antônio**, **Dani Dadalto**, **Sávio**, **Luiz Thiago**, **Luliani**, **Germana**, **Júlio**, **Jordana**, **Juliana**, **Marcell**, **Bruno**, **Lívia**, **Nei**, o pessoal do **IFF-Campos** e muitos outros. Às minhas lindas amigas da UENF que jamais deixaram a nossa amizade balançar devido à distância e falta de tempo nesses últimos anos, **Aline**, **Thaís**, **Emylli**, **Verônica**, **Ivy** e **Júlia**, obrigada pelo apoio e torcida.

Aos queridos companheiros limnólogos do dia a dia, a amizade e companheirismo fizeram toda a diferença durante essa caminhada. **Guilherme**, obrigada pela amizade e incentivo inicial para abraçar a bioturbação. **Maycon**, agradeço os ensinamentos no laboratório, a revisão e o mais precioso, a sua amizade. **Maria** (não adianta que não consigo chamar de Silvina), dessa jornada toda você foi o maior de todos os presentes, sua amizade chegou na hora que mais precisei e agradeço por sempre acertar nas palavras e conselhos. **Mariana**, como é bom ter você por perto, obrigada pela acolhida com sua amizade sincera no início e por ser tão presente durante todo esse tempo. **Samambaia**, **Dado**, **Paulinha**, **Nathália Ornelas** e **Carijó**, obrigada por me ensinarem a triar e por transformarem os momentos de monotonia em trabalho divertido e de muitas risadas. **Rodrigo**, meu amigo, meu outro grande presente, obrigada pela ajuda diária no laboratório, pelo auxílio sempre que meu computador me deixava encrocada, pelas conversas, conselhos e risadas. **Izabela**, obrigada

por ser nossa mãe e estar sempre disponível quando precisei, principalmente nestes últimos dias e quando sempre ficava doente. **Fabrcio**, além da amizade e ajuda no laboratório, meu agradecimento é em especial pela ajuda na estatística e na confecção dos microcosmos (com a ajuda indispensável de seu primo **Yuri França** na montagem dos motores). **Rafaela**, obrigada por toda ajuda no laboratório, principalmente nas dúvidas durante meus intermináveis cálculos que necessitavam de diversas transformações. **Alana**, obrigada pela parceria, torcida e o mais importante, sua companhia na hora de mobilizar a galera para os almoços e cafés em grupo (brincadeira). **Thaís**, obrigada pelo auxílio com as medidas e cálculos da  $p\text{CO}_2$ , além da amizade e dos momentos de muita risada. **João Marcelo**, obrigada pelos ensinamentos e ajuda em todos os campos, você tornava nosso dia de trabalho mais divertido e prazeroso, agradeço ainda a amizade sincera e por se preocupar comigo como um pai ou irmão mais velho. Aos mais recentes **Leo** e **Thiago**, obrigada pela torcida e incentivo nessa reta final. Além da participação de cada um durante todas as atividades nesse período, não posso deixar de agradecer especialmente por todos que ajudaram durante os dias do experimento, na coleta em campo, pelas madrugadas perdidas nas incubações, pelo profissionalismo em todas as etapas que deveriam ser realizadas por muitos e com extrema atenção, sem vocês a realização desse trabalho não seria possível.

Macaé tem suas qualidades, mas não foi o melhor lugar que já morei. Apesar disso, a presença das “Delícias” que formaram a nossa república confortaram períodos de dificuldades e solidão. Apesar de inúmeras diferenças, esse tempo foi muito bom ao lado de vocês e será inesquecível. **Felipe**, obrigada pelas palavras sinceras e por momentos de muita risada. **Hudson**, obrigada pela força e amizade, principalmente nesses últimos dias. Boneca (**Paula**), obrigada por sempre cuidar de mim, pela amizade sincera, você foi essencial nesse período e já faz muita falta, mas nada como quase 4 horas no telefone para matarmos a saudade. Às “Delícias” agregadas: **Nocchi, Carol, Machado, Evelyn, Paulo Ivo, Lupis** e **Gabi**, obrigada por me presentear com a amizade de vocês. Junto com eles, ganhei outros presentes em Macaé. **Rachel, Vagner, Bruna, Felipe, Carina, Fábio** e **Taylane**, queridos amigos que levarei para a vida! As conversas e os momentos divertidos serão eternizados.

Aos **coordenadores e secretários do PPGCiAC**, agradeço a compreensão e paciência pelo transtorno devido a prorrogação da defesa.

E para fazer deste “verão” um período feliz de aprendizado, ideias e conquistas, muitas “andorinhas” foram necessárias. Muito obrigada a todos vocês!

## RESUMO

EFEITO DO BIORREVOLVIMENTO POR *HELEOBIA AUSTRALIS* (D'ORBIGNY, 1835) (GASTROPODA) E *LAONEREIS CULVERI* (WEBSTER, 1880) (POLYCHAETA) SOBRE OS FLUXOS DE CARBONO INORGÂNICO NAS INTERFACES SEDIMENTO-ÁGUA-ATMOSFERA

Danieli Flavia Rossi

Orientador: Prof. Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Co-orientador: Prof. Dr. Vinicius Fortes Farjalla

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Conservação, Campus UFRJ-Macaé Professor Aloísio Teixeira, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Ecossistemas aquáticos são considerados componentes importantes no ciclo global do carbono. A interface sedimento-água de sistemas lênticos é um local de intensa atividade biológica e que predomina a deposição de material orgânico particulado e sua consequente mineralização. O compartimento bentônico é considerado relevante fonte de carbono inorgânico para o ecossistema aquático. Além disso, o processo de biorrevolvimento por macroinvertebrados bentônicos pode influenciar no ciclo do carbono nas interfaces sedimento-água-atmosfera, por promover alterações nas características do sedimento. Essa alteração pode apresentar efeitos e magnitude diferentes, dependendo das estratégias de colonização destas espécies no sedimento. O objetivo da presente pesquisa foi avaliar o efeito de duas espécies de macroinvertebrados bentônicos, com diferentes estratégias de colonização no sedimento, sobre o consumo de  $O_2$  e fluxos de CID nas interfaces sedimento-água-atmosfera. Foram realizadas incubações em microcosmos contendo as interfaces supracitadas, foram feitos três tratamentos com nove réplicas para cada espécie, a saber: *Laeonereis culveri* e *Heleobia australis*. O tratamento controle (sem animais) refere-se ao terceiro tratamento. A contribuição do plâncton e dos macroinvertebrados para o estoque de  $CO_2$  também foram avaliadas. Alíquotas iniciais e finais de água foram coletadas para determinação da  $pCO_2$  e concentração de CID e  $O_2$  na água. Os resultados demonstraram que a respiração dos

macroinvertebrados bentônicos contribui com valores ínfimos para o estoque de CO<sub>2</sub> na água quando comparado ao biorrevolvimento. Assim, fica evidente que a importância destes macroinvertebrados nos ecossistemas aquáticos se torna restrita ao efeito da biorrevolvimento e intensificação de processos transformadores do carbono orgânico em inorgânico.

Palavras-chave: Biorrevolvimento, Respiração, Macroinvertebrados Bentônicos, CO<sub>2</sub>.

Macaé

Julho, 2013

**ABSTRACT**

EFFECT OF BIOTURBATION BY *HELEOBIA AUSTRALIS* (D'ORBIGNY, 1835)  
(GASTROPODA) AND *LAEONEREIS CULVERI* (WEBSTER, 1880) (POLYCHAETA) ON  
THE FLOW OF INORGANIC CARBON IN SEDIMENT-WATER-ATMOSPHERE  
INTERFACES

Danieli Flavia Rossi

Orientador: Prof. Dr. Marcos Paulo Figueiredo de Barros

Co-orientador: Prof. Dr. Vinicius Fortes Farjalla

*Abstract* da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Conservação, Campus UFRJ-Macaé Professor Aloísio Teixeira, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais e Conservação.

Aquatic ecosystems are considered important components in the global carbon cycle. The sediment-water interface is a site of intense biological activity and that predominate the deposition of particulate organic material and its subsequent mineralization. The benthic compartment is considered a relevant source of organic carbon for the aquatic ecosystem. Furthermore, the process of bioturbation by benthic macroinvertebrates might influence in the cycle of the carbon in the sediment-water-atmosphere interfaces because promote changes in the characteristics of the sediment. This change can presents different effects and magnitude, depending on the strategy of colonization of these species in the sediment and through their own breathing. The objective of the present study was to evaluate the effect of two species of benthic macroinvertebrates, with different colonization strategies in the sediment, on the O<sub>2</sub> consumption and DIC flows in the sediment-water-atmosphere interfaces. Incubations were performed in microcosm containing the interfaces cited above, three treatments with nine replications were done for each species, as follows: *Laeonereis culveri* and *Heleobia australis*. The control treatment (without animals) refers to the third treatment. The

contribution of the plankton and of the macroinvertebrates was also evaluated. Initial and final aliquots of water were collected for determination of the  $p\text{CO}_2$  and DIC and  $\text{O}_2$  concentration in the water. The results demonstrated that the respiration of benthic macroinvertebrates contributes with negligible values for the stock of  $\text{CO}_2$  in water when compared to bioturbation. Thus, it is evident that the importance of macroinvertebrates in aquatic ecosystems becomes restricted to the effect of the bioturbation and intensification of transformers process of organic carbon in inorganic.

**Key-words:** Bioturbation, Respiration, Benthic Macroinvertebrates,  $\text{CO}_2$ .

Macaé

Julho, 2013

## SUMÁRIO

<b>1- INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2- HIPÓTESES</b> .....	<b>8</b>
<b>3- OBJETIVO</b> .....	<b>9</b>
<b>4- MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>10</b>
<b>4.1- Espécies de macroinvertebrados bentônicos utilizadas na pesquisa</b> .....	<b>10</b>
<b>4.2- Coleta e preparação para o experimento</b> .....	<b>11</b>
<b>4.3- Desenho experimental</b> .....	<b>12</b>
4.3.1- <i>Experimento 1: Incubação em microcosmos do sistema sedimento + água + macroinvertebrados bentônicos</i> .....	13
4.3.2- <i>Experimento 2: Consumo de O<sub>2</sub> e produção de CO<sub>2</sub> pela coluna d'água</i> .....	15
4.3.3- <i>Experimento 3: Consumo de O<sub>2</sub> e produção de CO<sub>2</sub> pela coluna d'água após incubação em microcosmos</i> .....	16
4.3.4- <i>Experimento 4: Respiração dos macroinvertebrados bentônicos</i> .....	16
<b>4.4- Análises das variáveis físico-químicas</b> .....	<b>17</b>
4.4.1- <i>Consumo de O<sub>2</sub></i> .....	17
4.4.2- <i>Fluxo de CID</i> .....	18
4.4.3- <i>CO<sub>2</sub> na atmosfera (headspace)</i> .....	18
4.4.4- <i>Pressão Parcial de CO<sub>2</sub> na água</i> .....	19
4.4.5- <i>Características do sedimento</i> .....	19
<b>4.5- Tratamento Estatístico</b> .....	<b>20</b>
<b>5- RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1- Características do sedimento</b> .....	<b>21</b>
5.1.1- <i>Teor de Matéria Orgânica</i> .....	21
5.1.2- <i>Granulometria</i> .....	21
<b>5.2- Comportamento dos organismos</b> .....	<b>21</b>
<b>5.3- Experimento 1: Incubação em microcosmos do sistema sedimento + água + macroinvertebrados bentônicos</b> .....	<b>22</b>
5.3.1- <i>Água</i> .....	22
5.3.1.1- <i>Consumo de Oxigênio, Fluxo da pCO<sub>2</sub> e Fluxo de CID por biomassa</i> .....	25
5.3.2- <i>Atmosfera (headspace)</i> .....	27
5.3.3- <i>Concentração de CO<sub>2</sub> nos compartimentos</i> .....	27
<b>5.4- Experimento 2: Consumo de O<sub>2</sub> e produção de CO<sub>2</sub> pela coluna d'água</b> .....	<b>28</b>
<b>5.5- Experimento 3: Consumo de O<sub>2</sub> e produção de CO<sub>2</sub> pela coluna d'água após incubação em microcosmos</b> .....	<b>29</b>
<b>5.6- Experimento 4: Respiração dos macroinvertebrados bentônicos</b> .....	<b>30</b>
<b>6- DISCUSSÃO</b> .....	<b>33</b>
<b>7- CONCLUSÕES</b> .....	<b>40</b>
<b>8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>41</b>

## 1- INTRODUÇÃO

Ecosistemas aquáticos são considerados componentes chave no ciclo global do carbono, pois a maior parte da mineralização da matéria orgânica ocorre nesses ambientes. Isso os torna importantes fontes de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. Esta forma inorgânica do carbono presente no meio aquático possui várias origens, da mesma forma que, através de transformações bioquímicas, pode ser reduzida a outros compostos. Nestes sistemas o carbono inorgânico pode apresentar-se na forma de  $\text{CO}_2$  livre, ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (del Giorgio *et al.*, 1997; Esteves, 2011).

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é um gás presente diretamente em processos bioquímicos inerentes ao metabolismo dos organismos, além de ser amplamente conhecido como um dos gases do efeito estufa. Dessa forma, com o objetivo principal de identificar as fontes de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera, o ciclo global do carbono (C) tem recebido maior atenção da comunidade científica nas últimas décadas (IPCC, 2012). Muitas dessas pesquisas são realizadas através de mensurações da pressão parcial de  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) das águas lacustres que corresponde a uma medida integrada de diversos processos que ocorrem nestes sistemas, como por exemplo, decomposição da matéria orgânica, respiração dos organismos, foto oxidação da matéria orgânica e oxidação do metano (Esteves, 2011). A  $p\text{CO}_2$  fornece uma medida integrada de todos os componentes metabólicos do ecossistema, ou seja, o balanço entre produção e respiração de componentes pelágicos e bentônicos. Dessa forma, a  $p\text{CO}_2$  permite uma avaliação geral do funcionamento do ecossistema e embora não seja uma medida direta do fluxo de carbono, é o fator mais importante influenciando esse fluxo (Sobek *et al.*, 2005; Prairie, 2008).

### *O Metabolismo Aquático e a produção de $\text{CO}_2$ nos sistemas aquáticos*

Produtores primários como o fitoplâncton e as plantas aquáticas, utilizam o carbono inorgânico presente na coluna d'água incorporando biomassa a partir da fotossíntese sendo a forma do carbono utilizada variável, seja na forma de  $\text{CO}_2$  ou bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Da mesma forma que a vegetação terrestre e plantas aquáticas emersas capturam o  $\text{CO}_2$  atmosférico, convertendo-o a glicídios e outras moléculas (Raven, 2007; Esteves, 2011). O material orgânico alóctone, através do aporte de matéria orgânica terrestre, juntamente com detritos de organismos que habitam os corpos d'água, tornam o carbono disponível na forma

orgânica particulada (COP). O carbono, em algum momento, será remineralizado produzindo CO<sub>2</sub> novamente. Este processo de decomposição da matéria orgânica é conduzido por macro e micro-organismos como fungos e bactérias, que por sua vez transformam o COP até chegar à forma de carbono orgânico dissolvido (COD). O COD representa um dos principais estoques de carbono nos ecossistemas aquáticos (Fenchel *et al.*, 1998; del Giorgio *et al.*, 1997).

A fotoxidação induzida pela radiação ultravioleta (UV), a respiração anaeróbica e a aeróbica utilizada por vários táxons, são processos que degradam moléculas orgânicas em compostos mais simples, sendo este último o mais expressivo (Graneli *et al.*, 1996; Kristensen, 2000; King, 2005). Sendo assim, a respiração aeróbica possui importância ecossistêmica na produção de CO<sub>2</sub>. A maior parte deste processo ocorre na coluna d'água, caracterizando a respiração planctônica. Esta por sua vez, é conduzida por organismos como fitoplâncton, zooplâncton, bacterioplâncton, dentre outros. Estima-se que anualmente a respiração planctônica é responsável pela emissão de 62 a 76 Tmol de carbono considerando todos os lagos do mundo, excedendo, portanto, todo o carbono que é fixado nesses mesmos ambientes (Pace & Prairie, 2005). Dessa forma, quando o CO<sub>2</sub> satura a coluna d'água, o gás é exportado para a atmosfera, como ocorre nos ecossistemas aquáticos heterotróficos. Esta emissão se dá através de processos difusivos ou ebulientes. Em menor escala, o CO<sub>2</sub> pode ser incorporado da atmosfera para a coluna d'água em lagos caracterizados como autotróficos, onde a produção primária é superior à respiração (Odum, 1956; del Giorgio *et al.*, 1997; Esteves, 2011).

Além da coluna d'água, o sedimento é outra importante fonte de CO<sub>2</sub> que interfere nos níveis de saturação deste gás no ecossistema aquático. A camada superficial do sedimento, caracterizada como interface sedimento-água, é um local de intensa atividade biológica e que predomina a deposição de material orgânico na forma particulada. Este compartimento, portanto, principalmente em ecossistemas lênticos, caracteriza-se como uma região de intensa decomposição da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes. Em consequência disso, sedimentos límnicos são importantes sítios de transformação e transporte do carbono (Carmouze, 1994).

Nas camadas superficiais do sedimento, prevalecem processos aeróbicos de mineralização da matéria orgânica, pois na maioria dos casos o oxigênio é utilizado como aceptor de elétrons, devido seu potencial redox (Brune *et al.*, 2000). Por conta disso, a camada óxica ocorre apenas nos primeiros centímetros do sedimento. A baixa solubilidade do oxigênio na água limita ainda mais a difusão desse gás para camadas mais profundas (Kristensen, 2000). Na região anóxica, um dos mais importantes processos de degradação da

matéria orgânica é a produção microbiana do metano (CH<sub>4</sub>), onde organismos metanogênicos promovem a redução do CO<sub>2</sub> à CH<sub>4</sub> utilizando uma molécula de hidrogênio (H<sub>2</sub>) como redutor (Zinder, 1993).

Além disso, a respiração da comunidade bentônica é outro fator que deve ser considerado como contribuinte na ciclagem do carbono em ecossistemas aquáticos. Trabalhos vêm demonstrando que macroinvertebrados bentônicos exercem influência significativa no balanço de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> em ecossistemas aquáticos através de sua respiração (Kristensen, 1985; Bartoli *et al.*, 2000; Jager & Walz, 2002; Figueiredo-Barros, 2004; Pohle & Hamburger, 2005; Brodersen *et al.*, 2008).

#### *Efeitos da comunidade de macroinvertebrados bentônicos na interface sedimento-água*

A comunidade de macroinvertebrados bentônicos vem sendo caracterizada em muitos estudos como intensificadora dos fluxos de gases do sedimento para a coluna d'água. Estes organismos promovem a modificação na estrutura do sedimento devido seu modo de colonizá-lo. Esse processo é chamado de bioturbação ou biorrevolvimento (Heilskov & Holmer, 2001; Leal *et al.*, 2007; Figueiredo-Barros *et al.*, 2009).

O biorrevolvimento é um processo biogênico que altera gradientes geofísicoquímicos, redistribui partículas e promove a troca de água no interior do sedimento e entre os compartimentos bentônicos e pelágicos de ecossistemas aquáticos. Através da bioturbação, processos ecológicos são alterados e até mesmo intensificados. Esse conjunto de atividades é considerado como bioengenhieramento de ecossistemas (Meysman *et al.*, 2006; Kristensen *et al.*, 2012).

De acordo com Leal (2003), o movimento desses organismos dentro e sobre o sedimento altera sua topografia através da deposição de fezes na superfície, produção de pelotas fecais, formação de rastros (trincheiras), covas, tubos e galerias que resulta na liberação de material dissolvido e/ou particulado para a coluna d'água (Figura 1). Diversos autores estudando o efeito do biorrevolvimento demonstraram mudanças físicas e químicas na interface sedimento-água, como por exemplo: a redistribuição do sedimento, a oxigenação das camadas mais profundas do sedimento e alterações no fluxo de nutrientes como metano, silicato, fósforo e nitrogênio (Mulsow & Boudreau, 1998; Leal, 2003; Tessenow, 1964; Figueiredo-Barros, 2004).

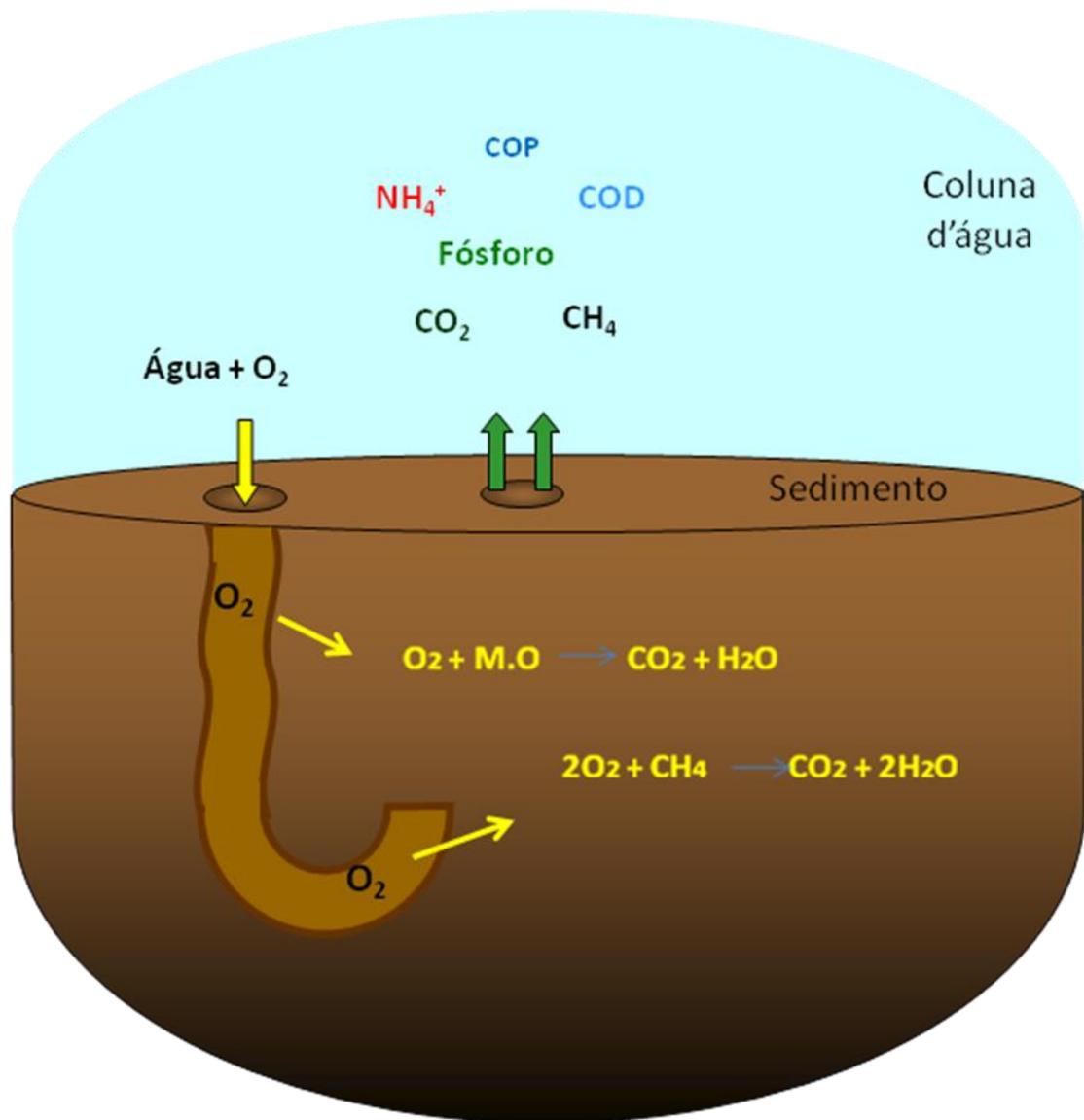


Figura 1: Esquema-síntese adaptado de Leal (2003) em estudo realizado em um lago amazônico, enfatizando a influência da espécie de macroinvertebrado bentônico *Campsurus notatus* (Ephemeroptera) na decomposição da matéria orgânica sedimentar e no fluxo de nutrientes como o  $\text{CO}_2$  na interface sedimento-água. A entrada de água oxigenada nas galerias no sedimento estimula reações de oxidação, produzindo  $\text{CO}_2$ . A diferença de coloração do sedimento indica onde o oxigênio está presente. O  $\text{CO}_2$  e muitos outros nutrientes são disponibilizados na coluna d'água através da movimentação de água que o invertebrado promove dentro de suas galerias.

No compartimento bentônico o biorrevolvimento intensifica a produção de  $\text{CO}_2$  por estimular a respiração dos micro-organismos que oxidam ácidos orgânicos, provenientes da mineralização da matéria orgânica, tendo como produto final,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  (Aller & Aller, 1998; Leal, 2003). Este fato torna este compartimento um importante reservatório de carbono na forma de  $\text{CO}_2$  intensificando seu fluxo do sedimento para a coluna d'água por difusão. Ao mesmo tempo o biorrevolvimento por macroinvertebrados bentônicos também pode aumentar

esse fluxo de CO<sub>2</sub> através do bombeamento (efeito físico) da água intersticial do sedimento, rica em CO<sub>2</sub>, para a água sobrejacente, bem como através da respiração biológica do próprio organismo. Estes três processos podem explicar o aumento dos fluxos de CO<sub>2</sub> no sedimento e na água quando colonizados por macroinvertebrados bentônicos (Figueiredo-Barros, 2004; Leal *et al.*, 2007).

Apesar do efeito dos invertebrados sobre os fluxos de CO<sub>2</sub> na interface sedimento-água, a intensidade deste processo pode variar dependendo da espécie estudada. De acordo com Figueiredo-Barros (2004) *Heleobia australis* (Gastropoda) e *Heteromastus similis* (Polychaeta) promoveram fluxos de CO<sub>2</sub> e outros nutrientes na interface sedimento-água com diferentes intensidades. Tal diferença foi atribuída às diferenças na forma de colonização destes organismos. Por exemplo, *H.australis* forrageia a superfície do sedimento, não ultrapassando a profundidade de 1centímetro, criando rastros ao longo da superfície do substrato. Este fato causa efeitos menos intensos sobre os fluxos de nutrientes (Figueiredo-Barros, 2004). Já a espécie *H. similis* (Capitelidae) constrói complexas redes de galerias podendo alcançar 10 centímetros de profundidade ao longo do perfil do substrato. De acordo com este autor, este distinto comportamento em relação a *H. australis* pode explicar os diferentes resultados em relação ao fluxo de CO<sub>2</sub>.

#### *Contextualização e relevância da presente pesquisa*

Ecossistemas aquáticos desempenham papel relevante na regulação do fluxo global do carbono e avaliações de sua condição metabólica vêm sendo registradas na literatura. Neste contexto, a saturação de CO<sub>2</sub> nesses ecossistemas e sua caracterização como sumidouro ou fonte desse gás para a atmosfera tornaram-se temas com grande destaque na comunidade científica.

A saturação de CO<sub>2</sub> nos ecossistemas aquáticos continentais se deve à interação de muitos processos em todos os seus compartimentos. Entretanto, o sedimento merece atenção especial, pois é considerado um importante sítio de transformação, transporte e estoque de carbono, visto que é um local de intensa atividade biológica e decomposição de matéria orgânica, de origem autóctone e alóctone.

Nessa temática, a respiração ecossistêmica é um processo de extrema relevância. Tal importância se deve ao fato de que a mineralização de compostos orgânicos acarreta a liberação de compostos inorgânicos como o dióxido de carbono. Além disso, a maioria dos

sistemas límnicos é supersaturada em CO<sub>2</sub>, ou seja, são emissores de dióxido de carbono para a atmosfera.

De acordo com Laque (2012) as lagoas costeiras pertencentes ao Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba (RJ), região da presente pesquisa, são em sua maioria, supersaturadas de CO<sub>2</sub> em relação à atmosfera, e esta observação pode ser atribuída à importância da respiração ecossistêmica. Neste sentido a respiração bentônica pode ter relevante papel, principalmente por serem, em alguns casos, ecossistemas com elevada densidade de macroinvertebrados bentônicos, sendo muitas destas lagoas dominadas por táxons como Gastropoda e Polychaeta. Além disso, estes ecossistemas aquáticos são rasos e com elevados teores de sedimentos orgânicos, fatores que interferem diretamente nos níveis de saturação de CO<sub>2</sub> do ecossistema aquático.

Neste contexto, são importantes os estudos do compartimento bentônico como fonte de CO<sub>2</sub> para a coluna d'água através do estímulo do fluxo de CO<sub>2</sub>, assim como estudos que avaliam como as taxas de respiração bentônica e planctônica podem variar em função do modo de colonização das espécies bentônicas. Entretanto, apesar do notório avanço científico no que diz respeito à respiração planctônica e bentônica e ao efeito da macrofauna bentônica através do biorrevolvimento sobre os fluxos de CO<sub>2</sub> na interface sedimento-água, pouco se sabe sobre o efeito da interação desses processos sobre a respiração ecossistêmica. Em sua maioria, nestas pesquisas os fatores são observados isoladamente considerando, por exemplo, o tamanho e forma do corpo, estratégia de colonização do sedimento, a atividade metabólica das espécies, dentre outros. Além disso, apesar de resultados mostrarem que a comunidade bentônica tem importante papel nos processos relacionados ao CO<sub>2</sub>, poucas espécies foram estudadas até então. Ademais, as considerações do efeito da macrofauna bentônica sobre o fluxo do dióxido de carbono refletidos na atmosfera são escassas.

Neste sentido, é de grande importância expandir tais avaliações para um maior número de espécies, principalmente aquelas que se distinguem no modo de colonizar o sedimento. A raridade de estudos que investem na análise da interação de processos, como citado acima, evidencia a existência de relevantes lacunas na literatura no que diz respeito ao papel de invertebrados bentônicos nas vias de produção e consumo do CO<sub>2</sub>. Sendo assim, ainda existem algumas questões a serem respondidas como, por exemplo:

➤ Macroinvertebrados bentônicos com diferentes formas de colonizar o sedimento promovem o mesmo efeito sobre as concentrações de CO<sub>2</sub> na interface sedimento-água-atmosfera?

➤ A respiração da macrofauna bentônica contribui de maneira significativa para o  $\text{CO}_2$  total presente na água?

## 2- HIPÓTESES

- Macroinvertebrados bentônicos alteram as concentrações de carbono inorgânico nas interfaces sedimento-água-atmosfera através do biorrevolvimento, sendo que a intensidade com que contribuem depende principalmente da sua forma de colonizar o sedimento.
- A contribuição do biorrevolvimento pelos macroinvertebrados bentônicos para o estoque de CO<sub>2</sub> na coluna d'água e atmosfera é maior do que pela sua respiração.

### **3- OBJETIVO**

Avaliar, através de ensaios em microcosmos, o efeito de duas espécies de macroinvertebrados bentônicos com diferentes estratégias de colonização no sedimento sobre o consumo de oxigênio dissolvido e fluxos de carbono inorgânico dissolvido nas interfaces sedimento-água-atmosfera.

## 4- MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1- Espécies de macroinvertebrados bentônicos utilizadas na pesquisa

Na presente pesquisa foram utilizadas duas espécies de macroinvertebrados bentônicos. O critério de escolha das espécies foi a abundância elevada na maioria das lagoas da região Norte Fluminense (Felix, 2012), e o fato de apresentarem diferentes formas de colonização do sedimento. São elas:

- *Heleobia australis* (d'Orbigny, 1835)

Pertence à classe Gastropoda e à família Hydrobiidae (figura 2). Possui ampla distribuição geográfica e ocupa habitats como lagoas costeiras e estuários. Segundo Felix (2012), a espécie foi a mais abundante em um estudo da distribuição das espécies de macroinvertebrados bentônicos nas lagoas costeiras da região. Alimenta-se de detritos e/ou de algas aderidas às plantas e macroalgas (Esteves, 2011). Sua colonização se dá na superfície do sedimento e seu movimento cria rastros e trincheiras.

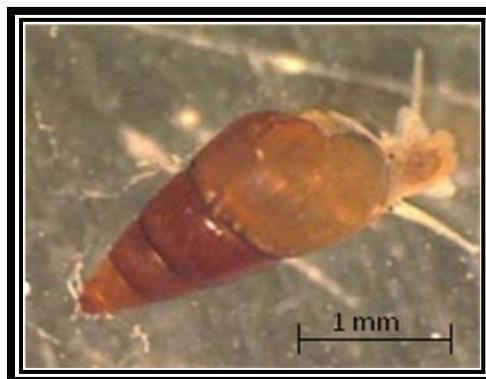


Figura 2: Imagem do *H. australis* (cerca de dois milímetros de comprimento).

- *Laeonereis culveri* (Webster, 1880)

Pertence à classe Polychaeta e à família Nereididae (Figura 3). A espécie possui ampla distribuição geográfica e no Brasil é encontrada ao longo de toda a zona costeira. Ocupa habitats marinhos e estuarinos, sendo tolerante às variações de temperatura e salinidade (Pettibone, 1971). É uma espécie detritívora e que constrói galerias desde a superfície até aproximadamente 30 cm de profundidade no sedimento (Esselink & Zwarts, 1989).



Figura 3: Imagem de dois indivíduos de *L.culveri* com aproximadamente cinco centímetros de comprimento cada um.

A densidade utilizada para as espécies (tabela 1) foi determinada de acordo com valores observados em trabalhos desenvolvidos nas lagoas costeiras da região norte fluminense (dados não publicados).

Tabela 1: Densidade dos indivíduos de cada espécie utilizados em cada tratamento.

<b>Tratamento</b>	<b>Densidade (Ind/m<sup>2</sup>)</b>
<i>Heleobia australis</i>	3786,82
<i>Laeonereis culveri</i>	1514,73

#### 4.2- Coleta e preparação para o experimento

Água, sedimento e os indivíduos de macroinvertebrados bentônicos utilizados na pesquisa foram coletados na Lagoa Pitanga que faz fronteira com a Lagoa Ubatuba no Parque Nacional (PARNA) da Restinga de Jurubatiba, município de Quissamã, litoral norte do estado do Rio de Janeiro, Brasil. A Lagoa Pitanga pode variar em períodos de água doce e salobra, pois possui um aporte de água doce através de um pequeno canal e sofre influência marinha por ser uma lagoa costeira.

A água foi coletada com recipientes de plástico e o sedimento coletado com tubos de polietileno e acrílico (Ambühl & Bühler, 1975). Ainda no campo, os organismos utilizados foram separados do sedimento e acondicionados em baldes plásticos que continham sedimento e água da lagoa. Posteriormente o material coletado foi levado para o Laboratório de Ecologia Aquática do Nupem/UFRJ para serem processados para o experimento. O sedimento coletado para as incubações foi colocado em seis aquários plásticos e congelado por 24 horas a fim de provocar a morte dos macroinvertebrados bentônicos presentes. O

sedimento foi então descongelado, homogeneizado e foi adicionada água da lagoa. Os aquários foram mantidos em repouso, sob constante aeração por 10 dias para estabilização e recuperação de seu gradiente de profundidade biogeoquímico. Os baldes com os organismos também foram mantidos sob oxigenação constante durante o mesmo período (Emmerson *et al.*, 2001; Caliman *et al.*, 2007).

### 4.3- Desenho experimental

Para ser possível responder às perguntas da presente pesquisa, o experimento necessitou ser dividido em várias etapas, com diferentes incubações que, na maioria das vezes, ocorriam simultaneamente (figura 4). Para melhor compreensão do desenho experimental, cada etapa será descrita separadamente a seguir.

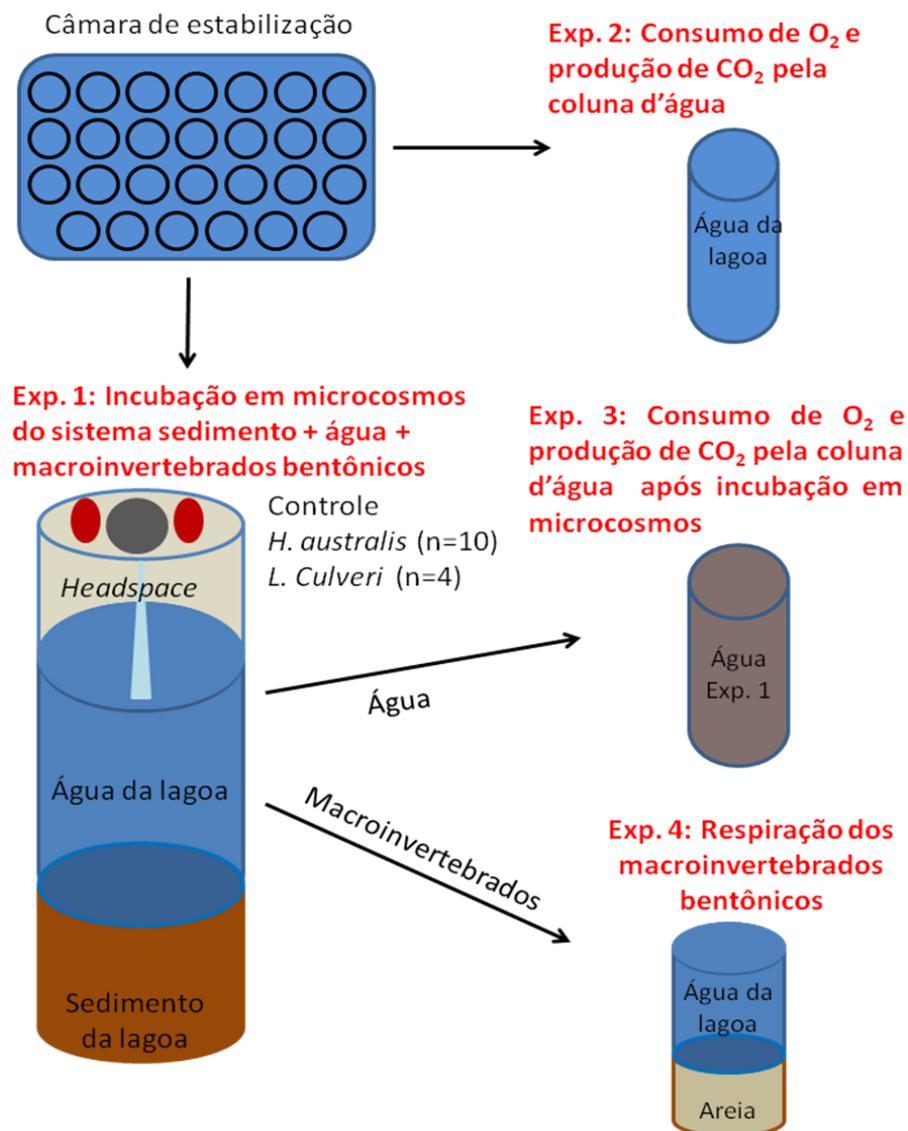


Figura 4: Esquema geral dos quatro experimentos realizados.

#### 4.3.1- Experimento 1: Incubação em microcosmos do sistema sedimento + água + macroinvertebrados bentônicos

Após os 10 dias de estabilização do sedimento, 27 tubos de acrílico (microcosmos) com 23 cm de altura e 6 cm de diâmetro, foram introduzidos no sedimento dos aquários (figura 5A) e retirados um a um aleatoriamente, sem alteração da coluna do sedimento.

Aos microcosmos, foi adicionada água da lagoa lentamente para não haver movimentação do sedimento. Posteriormente, os tubos com sedimento e água, foram transferidos a um recipiente plástico, de aproximadamente 50L, que foi posteriormente preenchido com água da lagoa (figura 5B). Os microcosmos foram mantidos submersos em água da lagoa e dentro de cada tubo foi colocada uma mangueira acoplada à bomba de aeração favorecendo a troca entre a água do interior do microcosmo e a água externa oxigenada, seguindo metodologia descrita por Svensson (1998) e Leal (2003).

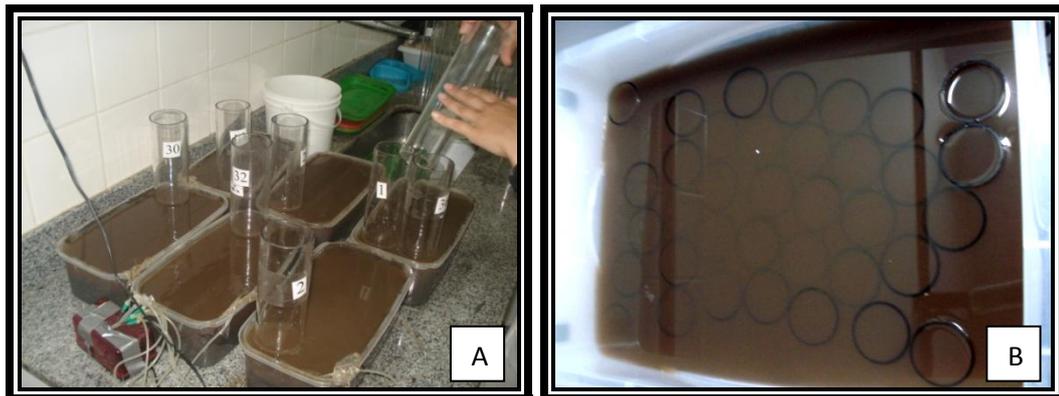


Figura 5: A) Introdução dos microcosmos no sedimento dos aquários; B) Microcosmos na câmara de estabilização.

Durante um período de 24 horas, os tubos foram mantidos abertos para estabilização da temperatura e da concentração de oxigênio. Após esse período, os tubos foram retirados aleatoriamente da câmara de estabilização. Com auxílio de seringa e mangueira, foi retirada uma alíquota de 25 mL de água de cada tubo e para a determinação do carbono inorgânico dissolvido (CID) inicial e 20 mL para análise da pressão parcial de  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) inicial.

Cada microcosmo do experimento continha sedimento (5-6 cm), água (14-15 cm) e atmosfera (*headspace*) (2-3 cm) (figura 6), sendo uma modificação do método proposto por Svensson & Leonardson (1996) e Leal *et al* (2007). Foram utilizados 3 tratamentos, com 9

réplicas em cada: *H. australis*, contendo 10 indivíduos por microcosmo; *L. culveri*, com 4 indivíduos desta espécie em cada microcosmo e controle, sem adição de macroinvertebrados.

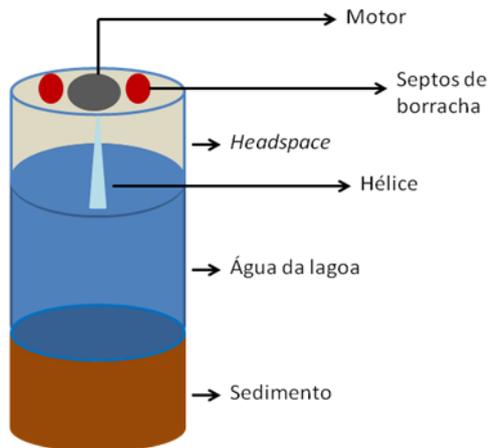


Figura 6: Esquema da estrutura dos microcosmos.

Foi mensurada a concentração de oxigênio e logo em seguida realizada a introdução dos organismos aos microcosmos. Posteriormente os microcosmos foram lacrados com uma tampa onde nesta continham septos para coleta de ar (com auxílio de seringa e agulha), e uma hélice acoplada a um motor, que homogeneizava o interior do tubo a uma velocidade que não fosse capaz de resuspender o sedimento (Svensson, 1998). Essa agitação era a mesma para todos os microcosmos, pois eram ligados em série em um regulador de voltagem. Após a vedação foi retirada uma alíquota de ar dos tubos para medir a concentração de  $\text{CO}_2$  inicial do *headspace* (figura 7A).

Durante aproximadamente 18 horas de incubação (figura 7B), os microcosmos foram mantidos no escuro e com temperatura constante de aproximadamente  $22^\circ\text{C}$ . O tempo de duração do experimento foi determinado a partir de um monitoramento da concentração de oxigênio em microcosmos extras. Após esse período, alíquotas de ar foram retiradas do *headspace* para quantificar a concentração final de  $\text{CO}_2$ , o microcosmo foi aberto e retiradas amostras de água para mensurar valores finais de CID e  $p\text{CO}_2$  (figura 7C).

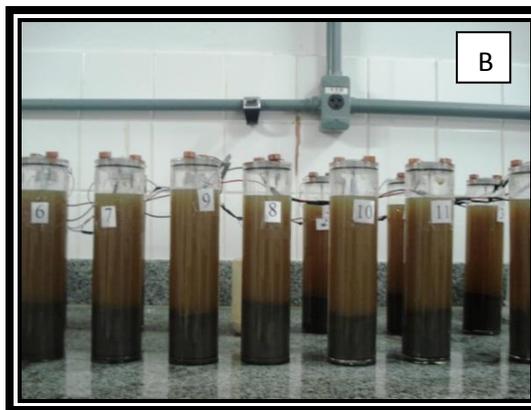
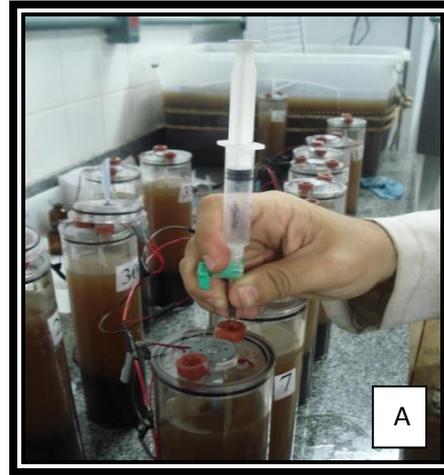


Figura 7: A) Uso de seringa e agulha para retirada de alíquotas de ar (*headspace*); B) Microcosmos montados e fechados para início da incubação; C) Retirada de água com auxílio de seringa e mangueira após a incubação para análises CID e  $p\text{CO}_2$ .

#### 4.3.2- Experimento 2: Consumo de $\text{O}_2$ e produção de $\text{CO}_2$ pela coluna d'água

Foram retiradas da câmara de estabilização, 13 alíquotas de 25 mL de água cada e separadas em frascos de vidro (figura 8A), onde cinco foram utilizadas para determinação do CID inicial e as oito restantes passaram por um período de incubação no escuro por aproximadamente 22 horas. Ao final, as amostras foram utilizadas para a determinação do CID e  $p\text{CO}_2$  finais.

#### 4.3.3- *Experimento 3: Consumo de O<sub>2</sub> e produção de CO<sub>2</sub> pela coluna d'água após incubação em microcosmos*

Após a incubação dos microcosmos descrita anteriormente, foi retirada uma alíquota de água de cada tubo para realizar uma nova incubação. Este experimento teve o objetivo de analisar possíveis alterações na respiração de microorganismos da coluna d'água em amostras que foram incubadas no experimento 1. As amostras foram mantidas no escuro durante 22 horas. Após esse período, foram transferidas para frascos de vidro âmbar para a determinação da  $p\text{CO}_2$ .

#### 4.3.4- *Experimento 4: Respiração dos macroinvertebrados bentônicos*

Após a Incubação dos microcosmos e retirada de todas as alíquotas de ar e água para análises, o sedimento foi triado, os organismos capturados e transferidos para frascos âmbar contendo água da lagoa e areia lavada e incinerada em mufla, a fim de eliminar toda a matéria orgânica presente (figura 8B). O experimento de respiração dos invertebrados teve duração de aproximadamente três horas de incubação. Nesse tratamento foi mensurada a concentração de oxigênio inicial e final. Após o período de incubação, a água foi retirada para determinação da  $p\text{CO}_2$  e os indivíduos foram transferidos para uma estufa a 60°C para análise da biomassa.



Figura 8: A) Frascos onde foram realizadas as incubações da água e da água após a incubação dos tubos; B) Frasco de vidro âmbar com um poliqueta no momento da incubação para análise da respiração dos macroinvertebrados bentônicos.

#### 4.4- Análises das variáveis físico-químicas

Para determinação das taxas de liberação e/ou consumo das variáveis analisadas – oxigênio e CO<sub>2</sub> - foi utilizado a seguinte equação (Dalsgaard *et al.*, 2000):

$$\Delta \text{Variável} = ([f] - [i]) \cdot v / a \cdot t \quad (1)$$

Onde :  $[f]$  - concentração final;

$[i]$  - concentração inicial;

Sendo: CID (mg);

$p\text{CO}_2$  ( $\mu\text{atm}$ );

O<sub>2</sub> (mmol).

$v$  - volume de água contido nos recipientes (litros);

$a$  - área da base do recipiente (metros);

$t$  - tempo total de incubação (horas).

Como descrito acima, a densidade de ambas as espécies foi diferente em cada tratamento. Portanto, dividiram-se os valores dos resultados pela biomassa (peso seco) dos organismos, a fim de avaliar a influência de cada espécie em unidade de massa (g PS) nos resultados obtidos após o biorrevolvimento retirando o efeito da densidade nos tratamento e do peso do macroinvertebrado.

##### 4.4.1- Consumo de O<sub>2</sub>

A concentração de oxigênio foi medida através de um micro-eletrodo (OX-N, Unisense) acoplado a um picoamperímetro (PA2000, Unisense). Segundo Briand *et al.*, (2004), a metodologia consiste na sensibilização, pelo oxigênio, de um micro-eletrodo de ouro que ao se oxidar emite impulsos elétricos registrados pelo pico-amperímetro e um computador. Antes de dar início às medições, o eletrodo é calibrado com soluções saturadas e completamente livres de oxigênio (100 e 0% de saturação, respectivamente). A solução saturada foi preparada

através da oxigenação da água da própria lagoa com auxílio de uma pequena bomba de ar e um difusor. Esta solução de 100% de saturação era com a água da lagoa a fim de evitar que diferenças na salinidade e concentração de outras substâncias influenciassem a solubilidade de oxigênio na água. A solução com ausência de oxigênio (0%) é preparada com NaOH 0,1 M saturada com ácido ascórbico. O microeletrodo é construído com um catodo-guarda, o que dificulta o consumo de oxigênio pelo sensor ( $4,7$  a  $47 \cdot 10^{-7} \text{ mmol.h}^{-1}$ ). Os eletrodos possuem um tempo de resposta menor que 1 segundo e precisão de  $0,1 \text{ }\mu\text{M}$  (Briand *et. al.*, 2004).

#### 4.4.2- Fluxo de CID

A determinação de CID foi realizada em um analisador de carbono (TOC-5000, Shimadzu), onde o carbono inorgânico dissolvido presente na amostra é acidificado, com transformação em  $\text{CO}_2$ , e detectado com um sensor de infravermelho.

#### 4.4.3- $\text{CO}_2$ na atmosfera (headspace)

A partir das alíquotas de ar coletadas com seringa e agulha, foram estimadas as concentrações de  $\text{CO}_2$  através de cromatografia gasosa utilizando um cromatógrafo (CG 2010 - Shimadzu) no qual utiliza o nitrogênio como gás de arraste. Para a determinação das áreas dos cromatogramas, foi utilizado o programa CG-Solution.

Como resultado, o cromatógrafo fornece um valor que se refere à área do pico do  $\text{CO}_2$ . A partir desse valor foi calculada a concentração do gás, a partir da seguinte fórmula:

$$[\text{padrão } \text{CO}_2] \cdot A_{\text{amostra}} = [\text{amostra}] \cdot A_{\text{padrão}} \quad (2)$$

Onde:  $[\text{padrão } \text{CO}_2]$  - Concentração do padrão de  $\text{CO}_2$ ;

$A_{\text{amostra}}$  - Área do cromatograma da amostra;

$[\text{amostra}]$  - Concentração da amostra;

$A_{\text{padrão}}$  - Área do cromatograma do padrão de  $\text{CO}_2$ .

#### 4.4.4- Pressão Parcial de CO<sub>2</sub> na água

A determinação da  $p\text{CO}_2$  foi obtida através de um método de equilíbrio do *headspace* (Hesslein *et al.*, 1991; Cole *et al.*, 1994). Isolou-se 20 mL de amostra de água dos tratamentos em frascos de vidro âmbar. No momento da leitura foram inseridos 10 mL de ar da atmosfera em cada um dos frascos e estes foram agitados vigorosamente por 1 minuto para que as concentrações de CO<sub>2</sub> entre a amostra de água e a atmosfera dentro do frasco entrassem em equilíbrio (Cole & Caraco, 1998). Posteriormente, com auxílio de uma seringa e agulha, aproximadamente cinco mL de ar foram retirados da atmosfera contida no frasco e imediatamente injetados no cromatógrafo. A partir daí, para encontrarmos o valor da pressão parcial de CO<sub>2</sub> em  $\mu\text{atm}$  calcula-se:

$$x (\mu\text{atm}) = (\text{área CO}_2 \cdot 380) / \text{área CO}_2 \text{ atm} \quad (3)$$

onde :  $\text{área CO}_2$  – Área do pico de CO<sub>2</sub> da amostra no cromatógrafo;

$\text{área CO}_2 \text{ atm}$  - Área do pico de CO<sub>2</sub> da atmosfera no cromatógrafo;

$x$  – Concentração da atmosfera ( $\mu\text{atm}$ ).

380: ( $\mu\text{atm}$ ) Valor de equilíbrio com a atmosfera

#### 4.4.5- Características do sedimento

Parte do sedimento dos aquários foi separada para análise granulométrica segundo metodologia de Suguio (1973). As amostras foram lavadas com água sobre peneira de abertura 0,062 mm sendo, portanto retidas as frações maiores que 0,062 mm. Estas foram secas em placa aquecedora e peneiradas para a determinação das diversas classes de areias. As frações menores que 0,062 mm (siltes e argilas), foram acondicionadas em bandejas de alumínio, secas e posteriormente pesadas, estimando-se assim a porcentagem destas frações no sedimento. O peneiramento das frações de areia maior que 0,062 mm, foi feito em peneiras com aberturas variando de 1,00 a 0,062 mm, sendo estas acopladas a um agitador magnético durante 15 minutos.

Alíquotas do sedimento foram retiradas para determinação do teor de matéria orgânica presente através de incineração à 550 °C durante 4 horas (Jackson, 1962).

#### **4.5- Tratamento Estatístico**

Diferenças entre os tratamentos com organismos e controles foram testadas usando a Análise de Variância (One-Way ANOVA) seguida de um teste de comparação múltipla (Tukey). Contudo, no momento em que o número das réplicas era diferente entre os tratamentos ou quando estes não eram homogêneos e não possuíam distribuição normal, utilizou-se o teste não paramétrico Kruskal-Wallis ANOVA com teste a *posteriori* de múltiplas comparações e DUNN. O teste não paramétrico Mann Whitney foi utilizado com a finalidade de comparação entre duas variáveis. Em alguns casos, os dados foram transformados para  $\text{LOG}_{10}X$  a fim de possuírem distribuição normal e homogeneidade. Em todas as análises estatísticas, foi considerado um nível de significância de 0,05. Antes de qualquer análise dos tratamentos referidos, os pressupostos de normalidade e homocedasticidade de variâncias foram testados usando respectivamente o método de Shapiro-Wilk e o teste de Levene. Os programas STATISTICA v. 8.0 (StatSoft Inc., 2007) e Microsoft Excel v. 2007 foram utilizados para as análises estatísticas.

## 5- RESULTADOS

### 5.1- Características do sedimento

#### 5.1.1- Teor de Matéria Orgânica

O teor de matéria orgânica apresentou média de 79,08%  $\pm$  0,32, sendo considerado orgânico segundo Ungemach (1960).

#### 5.1.2- Granulometria

Em relação ao sedimento utilizado no experimento de Incubação em microcosmos, silte + argila foi a fração granulométrica mais abundante encontrado, apresentando 51,97% do total de sedimento analisado, seguido de areia fina com 28,05%, depois areia média com 19,13% e areia grossa com apenas 0,87% (tabela 2).

Tabela 2: Granulometria do sedimento da lagoa utilizado no experimento de Incubação em microcosmos.

<b>Granulometria</b>	<b>Porcentagem</b>
Areia grossa	0,87
Areia média	19,13
Areia fina	28,05
Silte + argila	51,97

### 5.2- Comportamento dos organismos

O *Heleobia australis* por forragear apenas a superfície do sedimento, não formou tubos ou galerias, colonizou apenas a superfície do sedimento. O poliqueta *Laeonereis culveri*, assim que introduzido ao microcosmo, rapidamente se enterrava no sedimento construindo galerias por toda a extensão do sedimento (figura 9).

Após o período de incubação nos microcosmos, todos os macroinvertebrados se encontravam vivos e ativos sendo possível a realização do experimento de respiração dos organismos com os mesmos indivíduos.



Figura 9: Galerias no sedimento confeccionadas pelo *L. culveri* e um dos organismos do microcosmo saindo da galeria na superfície do sedimento.

### **5.3- Experimento 1: Incubação em microcosmos do sistema sedimento + água + macroinvertebrados bentônicos**

#### *5.3.1- Água*

Com relação ao consumo de oxigênio nos microcosmos controles e com organismos, foram observadas diferenças significativas apenas para a espécie *L. culveri*, onde foi verificada a maior taxa de consumo (ANOVA ONE-WAY com posterior teste de Tukey,  $p < 0,05$ ) ( $F(2)=10,61$ ;  $p < 0,001$ ). O consumo de oxigênio dos tratamentos com o Polychaeta foi significativamente maior quando comparado com o consumo do tratamento controle e de *H. australis*. Já a comparação entre o controle e o tratamento com o *H. australis* não houve diferença significativa. O consumo de  $O_2$  nos tratamentos controle variou de -0,09 a 0,54

$\text{mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ , de -0,09 a 0,15  $\text{mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para *H. australis* e de 0,11 a 0,50  $\text{mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para *L. culveri* (figura 10A).

Os tratamentos com o *H. australis* apresentaram consumo médio de apenas 1,97% do oxigênio enquanto os tratamentos com o *L. culveri* apresentaram consumo médio de 15,53% do oxigênio disponível no início da incubação.

Com relação à  $p\text{CO}_2$ , não foram observadas diferenças significativas entre o tratamento com *H. australis* e o controle. Já para a espécie *L. culveri* foram observadas diferenças significativas em relação ao controle e ao tratamento com *H. australis*. Já a comparação entre os tratamentos controle e o com o *H. australis* não foi observada diferença significativa (Kruskal-Wallis ANOVA,  $p < 0,05$ ) ( $H(2)=9,23$ ;  $p < 0,01$ ) (Figura 10B).

O fluxo da  $p\text{CO}_2$  nos tubos Controle variou de -3.263,14 a 64.839,95  $\mu\text{atm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ , de -6.193,39 a 9.466,11  $\mu\text{atm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para *H. australis* e de 21.264,83 a 35.532,14  $\mu\text{atm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para *L. culveri*.

Para o CID, os maiores valores observados foram encontrados nos tratamentos com a espécie *L. culveri*, onde o fluxo variou de 31,99 a 68,78  $\text{mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  caracterizando uma liberação do sedimento para a coluna d'água. Em tratamentos com o *H. australis* os valores variaram entre 9,64 e 13,76  $\text{mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  e o controle entre 5,86 e 15,05  $\text{mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ . Observou-se que os resultados médios de fluxo de CID referentes à *L. culveri* foram superiores em até cinco vezes em comparação a *H. australis* e 4,5 vezes maior em relação ao controle.

Com relação aos microcosmos controles e com introdução de organismos, foram observadas diferenças significativas apenas para a espécie *L. culveri*, onde foi verificado o maior fluxo de CID (Kruskal-Wallis ANOVA,  $p < 0,05$ ) ( $H(2)=17,67$ ;  $p < 0,001$ ) (Figura 10C). Entretanto, não são encontradas diferenças significativas quando o tratamento controle é comparado com o *H. australis*.

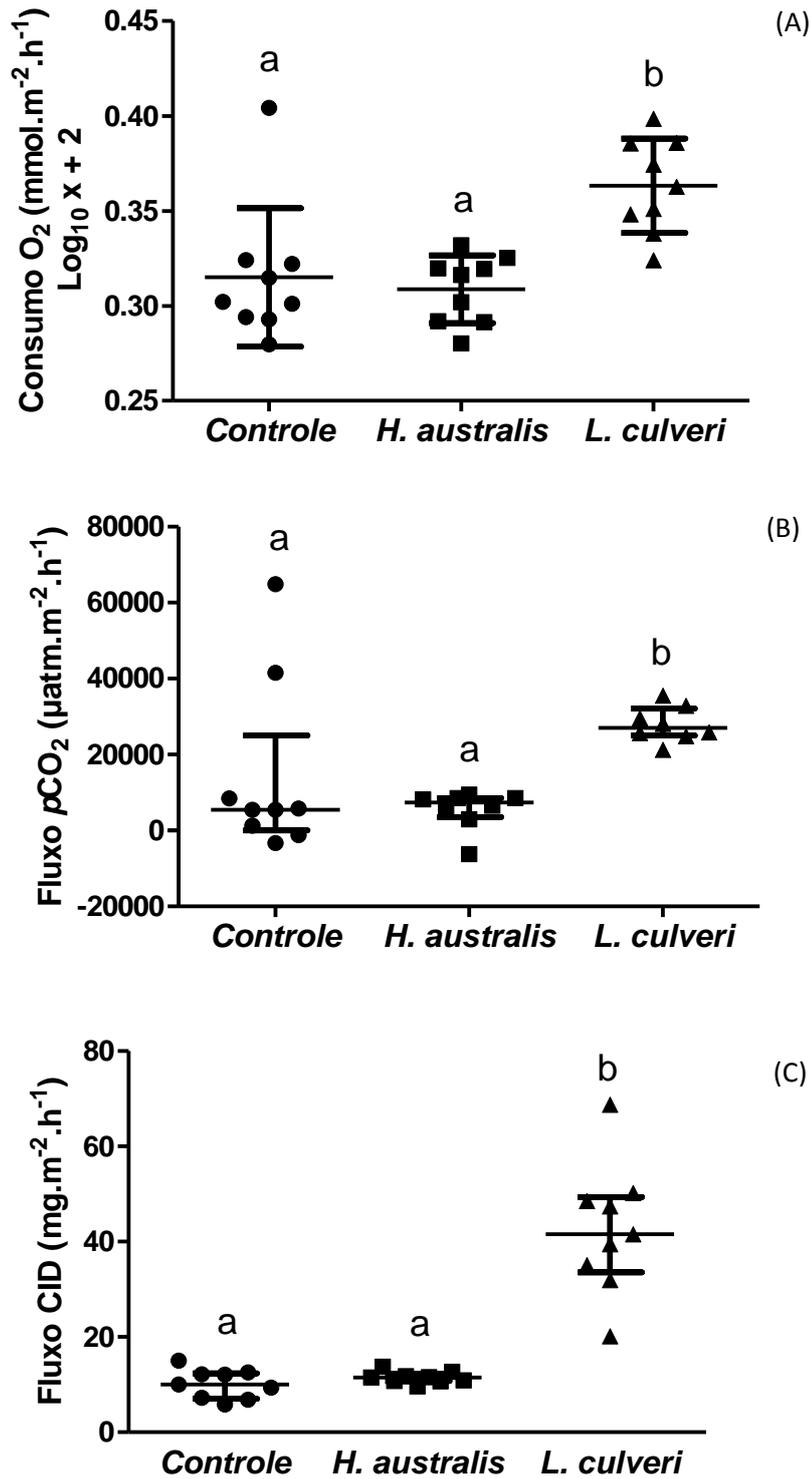


Figura 10: Resultados obtidos na água a partir do experimento de Incubação em microcosmos nos diferentes tratamentos. (A) Taxa de consumo de oxigênio; (B) Fluxo da pressão parcial de  $\text{CO}_2$ ; (C) Fluxo de carbono inorgânico dissolvido. Os pontos representam os valores encontrados. Letras minúsculas diferentes indicam tratamentos acima dos valores estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ ). Em (A) as linhas horizontais centrais representam a média e as linhas inferior e superior representam o desvio padrão. Em (B) e (C) as linhas horizontais centrais representam a mediana e as linhas inferior e superior representam o intervalo interquartil.

### 5.3.1.1- Consumo de Oxigênio, Fluxo da $p\text{CO}_2$ e Fluxo de CID por biomassa

Os resultados referentes ao consumo e fluxo por biomassa estão representados na figura 11 e, de forma geral, demonstraram que *L. culveri* exerce maior influência do que *H. australis* através do processo de biorrevolvimento.

Com relação ao consumo de  $\text{O}_2$  por biomassa (g PS), foram observadas diferenças significativas entre as espécies *H. australis* e *L. culveri* (ANOVA ONE-WAY com posterior Teste Tukey,  $p < 0,05$ ) ( $F = 68,16$ ;  $p < 0,001$ ). O consumo de  $\text{O}_2$  variou de  $-1,32$  a  $2,47 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{g}^{-1}$  PS para *H. australis* e de  $4,59$  a  $17,13 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{g}^{-1}$  PS para *L. culveri*. O consumo médio de  $\text{O}_2$  por biomassa (g PS) de *L. culveri* foi aproximadamente oito vezes superior ao de *H. australis* (figura 11A).

Diferenças significativas foram observadas quando a pressão parcial de  $\text{CO}_2$  por biomassa (g PS) foi analisada entre as espécies de macroinvertebrados bentônicos (Mann-Whitney,  $p < 0,05$ ) ( $Z = -3,36$ ;  $p < 0,001$ ). O fluxo da  $p\text{CO}_2$  variou de  $-87.600,99$  a  $177.319,32 \mu\text{atm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{g}^{-1}$  PS para *H. australis* e de  $270.277,51$  a  $1.616.572,14 \mu\text{atm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{g}^{-1}$  PS para *L. culveri*. O fluxo médio da  $p\text{CO}_2$  por biomassa (g PS) de *L. culveri* foi 11,5 vezes superior ao de *H. australis* (figura 11B).

Com relação ao fluxo de CID por biomassa (g PS), foram observadas diferenças significativas entre as espécies *H. australis* e *L. culveri* (ANOVA ONE-WAY com posterior Teste Tukey,  $p < 0,05$ ) ( $F = 223,96$ ;  $p < 0,001$ ). O fluxo de CID variou de  $131,79$  a  $277,91 \text{ mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{g}^{-1}$  PS para *H. australis* e de  $626,94$  a  $2.136,61 \text{ mg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{g}^{-1}$  PS para *L. culveri*. O fluxo médio de CID por biomassa (g PS) de *L. culveri* foi quatro vezes superior ao de *H. australis* (figura 11C).

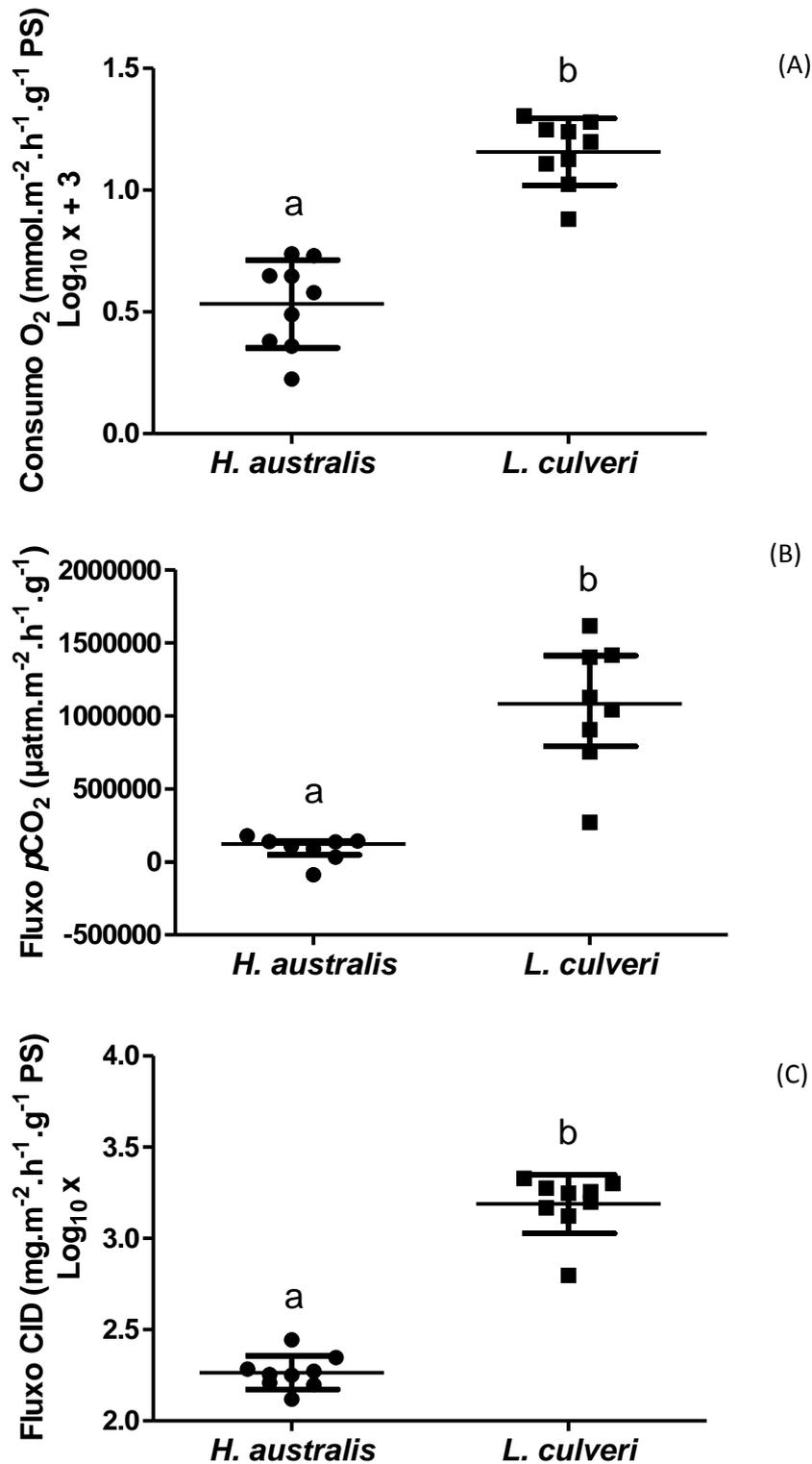


Figura 11: Resultados obtidos na água a partir do experimento de Incubação em microcosmos nos diferentes tratamentos pela biomassa (g PS). (A) Taxa de consumo de oxigênio; (B) Fluxo da pressão parcial de CO<sub>2</sub>; (C) Fluxo de carbono inorgânico dissolvido. Os pontos representam os valores encontrados. Letras minúsculas diferentes indicam tratamentos acima dos valores estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ ). Em (A) e (C) as linhas horizontais centrais representam a média e as linhas inferior e superior representam o desvio padrão. Em (B) as linhas horizontais centrais representam a mediana e as linhas inferior e superior representam o intervalo interquartil.

### 5.3.2- Atmosfera (headspace)

Com relação à concentração de  $\text{CO}_2$  no *headspace*, foram observadas diferenças significativas para a espécie *L. culveri*, onde foi verificado maior fluxo (Kruskal-Wallis ANOVA com posterior teste DUNN,  $p < 0,05$ ) ( $H(2) = 7,95$ ;  $p = 0,019$ ) (Figura 12).

O fluxo de  $\text{CO}_2$  no *headspace* dos tratamentos com o Polychaeta foi significativamente maior quando comparado com o consumo observado nos tratamentos controle e com *H. australis*. Já a comparação entre o controle e o tratamento com o *H. australis* não houve significância. O fluxo de  $\text{CO}_2$  nos tratamentos controle variou de  $-43,67$  a  $28,50 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ , de  $-7,80$  a  $43,32 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para *H. australis* e de  $-31,10$  a  $178,89 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para *L. culveri*.

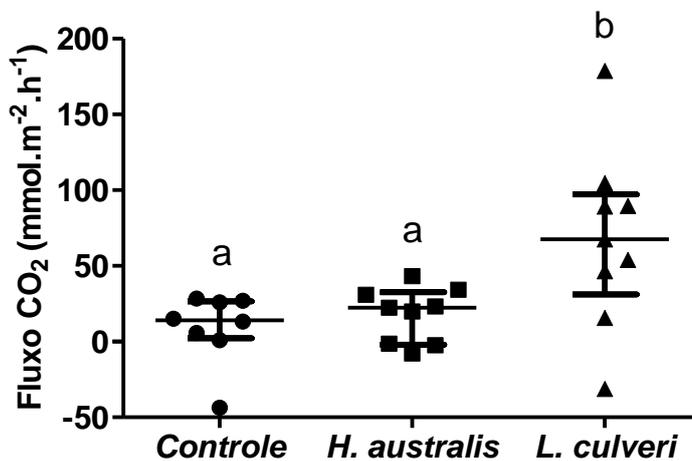


Figura 12: Efeito de diferentes espécies de macroinvertebrados bentônicos sobre o fluxo de  $\text{CO}_2$  na atmosfera. Os pontos representam os valores encontrados. Letras diferentes indicam tratamentos acima dos valores estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ ). As linhas horizontais centrais representam a mediana e as linhas inferior e superior representam o intervalo interquartil.

### 5.3.3- Concentração de $\text{CO}_2$ nos compartimentos

Em relação aos compartimentos, foi possível observar que, tanto na água como na atmosfera os tratamentos com macroinvertebrados apresentaram valores maiores do que o tratamento controle no final da incubação. Na atmosfera foi possível encontrar valores cerca de 300 vezes maiores que o encontrado na água nos tratamentos com macroinvertebrados bentônicos (figura 13).

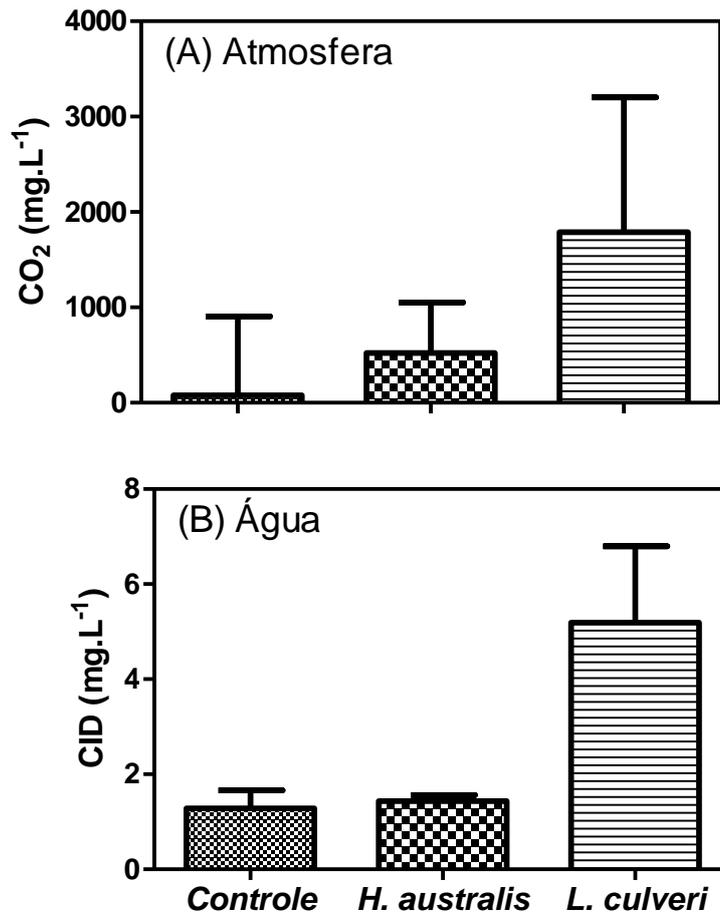


Figura 13: Efeito de diferentes espécies de macroinvertebrados bentônicos sobre a concentração de carbono inorgânico dissolvido na atmosfera (A) e na água (B) no experimento de Incubação em microcosmos. Barras correspondem a média e as linhas o desvio padrão.

#### 5.4- Experimento 2: Consumo de O<sub>2</sub> e produção de CO<sub>2</sub> pela coluna d'água

Com relação às amostras do experimento de incubação da água, foram observadas diferenças significativas entre os momentos inicial e final da incubação para oxigênio (Mann-Whitney  $p < 0,05$ ) ( $Z = 4,16$ ;  $p < 0,01$ ). O consumo médio de O<sub>2</sub> pelo plâncton foi de 1,5 mmol.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup>. A concentração de O<sub>2</sub> no início da incubação variou de 0,277 a 0,285 mmol.L<sup>-1</sup> e de 0,228 a 0,244 mmol.L<sup>-1</sup> no fim da incubação (tabela 3).

Não foi encontrada diferença significativa quando comparado os valores iniciais e finais da  $p\text{CO}_2$  (Mann-Whitney,  $p < 0,05$ ) ( $Z = 0,44$ ;  $p = 0,65$ ). A  $p\text{CO}_2$  no início da incubação variou de 1.468,65 a 1.799,26  $\mu\text{atm}$  e de 1.390,52 a 2.113,07  $\mu\text{atm}$  no fim do experimento (tabela 3).

A concentração de CID observado para esse tratamento diferiu significativamente antes e depois da incubação (Mann-Whitney  $p < 0,05$ ) ( $Z = -2,44$ ;  $p = 0,01$ ). Os valores iniciais

variaram entre 9,80 e 9,96 mg.L<sup>-1</sup>, e os valores finais entre 16,05 e 16,5 mg.L<sup>-1</sup>. A produção de CID pelo plâncton na água foi em média 23,92 mg.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> (tabela 3).

Tabela 3: Valores médios ± desvios padrões obtidos nos momentos iniciais e finais do experimento de Incubação da água para oxigênio, pressão parcial de CO<sub>2</sub> e carbono inorgânico dissolvido.

	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>
<b>Oxigênio (mmol.L<sup>-1</sup>)</b>	0,28 ± 0,00 <b>a</b>	0,24 ± 0,00 <b>b</b>
<b>pCO<sub>2</sub> (µatm)</b>	1627,61 ± 120,60 <b>a</b>	1692,63 ± 375,52 <b>a</b>
<b>CID (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	9,85 ± 0,07 <b>a</b>	16,32 ± 0,20 <b>b</b>

### **5.5- Experimento 3: Consumo de O<sub>2</sub> e produção de CO<sub>2</sub> pela coluna d'água após incubação em microcosmos**

O consumo médio de O<sub>2</sub> pelo plâncton após a incubação dos tratamentos controle e com *H. australis* foi de 0,10 mmol.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> e de 0,14 mmol.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para a água após a incubação nos tratamentos com o *L. culveri*. Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos (Kruskal-Wallis ANOVA p<0,05) (H(2)=4,88; p=0,09). Contudo, pode-se perceber que o consumo de O<sub>2</sub> médio do plâncton nos tratamentos com *L. culveri* foi maior em relação aos outros tratamentos (tabela 4).

Efeitos significativos foram observados quando a pressão parcial de CO<sub>2</sub> foi analisada entre os tratamentos (Kruskal-Wallis ANOVA p<0,05) (H(2)=12,28; p<0,01). O tratamento controle não diferiu significativamente dos tratamentos com os macroinvertebrados bentônicos. Já o tratamento com *H. australis*, teve diferença significativa quando comparado com o tratamento do *L. culveri*. A pCO<sub>2</sub> variou de -2.744,03 a 3.432,85 µatm.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para o tratamento controle, de 1.276, 71 a 8.887,64 µatm.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para *H. australis* e de -2.298,7 a 3.649,47 µatm.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para *L. culveri* (tabela 4).

Tabela 4: Valores médios  $\pm$  desvios padrões obtidos no experimento de Incubação da água após incubação em microcosmos. Letras diferentes indicam tratamentos acima dos valores estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ ) para o oxigênio e pressão parcial de  $\text{CO}_2$ .

	<b>controle</b>	<b><i>H. australis</i></b>	<b><i>L. culveri</i></b>
<b><math>\text{O}_2</math> (mmol.L<sup>-1</sup>)</b>	0,03 $\pm$ 0,01 <b>a</b>	0,03 $\pm$ 0,01 <b>a</b>	0,04 $\pm$ 0,01 <b>a</b>
<b><math>p\text{CO}_2</math> (<math>\mu\text{atm}</math>)</b>	1280 $\pm$ 1919 <b>ab</b>	4662 $\pm$ 2760 <b>a</b>	-966 $\pm$ 883 <b>b</b>

#### 5.6- Experimento 4: Respiração dos macroinvertebrados bentônicos

Com relação a consumo de  $\text{O}_2$  no experimento de respiração de macroinvertebrados bentônicos, foi observada diferença significativa entre as espécies *H. australis* e *L. culveri*. Quando o controle é comparado com os tratamentos com adição de macroinvertebrados bentônicos, é observada diferença significativa apenas para o tratamento com o poliqueta (Kruskal-Wallis ANOVA  $p < 0,05$ ) ( $H(2)=16,83$ ;  $p < 0,01$ ). O consumo de  $\text{O}_2$  variou de 0,18 a 0,55 mmol.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para o tratamento controle, de 0,63 a 0,83 mmol.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para o tratamento com *H.australis* e de 1,04 a 1,72 mmol.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para *L.culveri*. O consumo de  $\text{O}_2$  de *L.culveri* foi quase duas vezes superior ao de *H. australis* e mais de três vezes superior que o tratamento controle (figura 14A).

Efeitos significativos não foram observados quando a pressão parcial de  $\text{CO}_2$  foi analisada entre os tratamentos (Kruskal-Wallis ANOVA  $p < 0,05$ ) ( $H(2)=4,91$ ;  $p=0,08$ ). A  $p\text{CO}_2$  variou de 10.272,93 a 18.255,38  $\mu\text{atm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para o tratamento controle, de 13.460,18 a 123.100,7 para *H. australis* e de 16.321,12 a 39.084,29  $\mu\text{atm.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  para *L. culveri* (figura 14B).

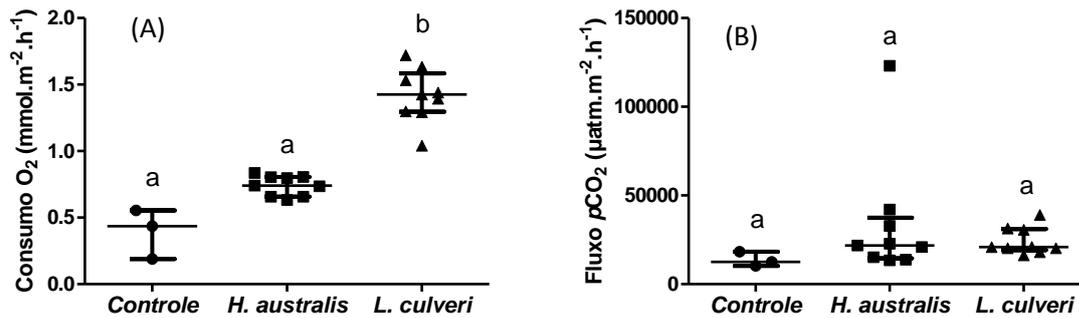


Figura 14: Resultados obtidos nos diferentes tratamentos no experimento de Respiração dos macroinvertebrados bentônicos. (A) Taxa de consumo de oxigênio; (B) Fluxo da pressão parcial de CO<sub>2</sub>. Os pontos representam os valores encontrados. Letras minúsculas diferentes indicam tratamentos acima dos valores estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ ). As linhas horizontais centrais representam a mediana e as linhas inferior e superior representam o intervalo interquartil.

A fim de retirar o efeito da respiração do plâncton, a figura 15 apresenta valores de consumo de O<sub>2</sub> e fluxo de pCO<sub>2</sub> no qual a média do tratamento controle é descontada.

O consumo de O<sub>2</sub> foi significativamente diferente entre as espécies *H. australis* e *L. culveri* (ANOVA ONE-WAY,  $p < 0,05$ ) ( $F = 108,2$ ;  $p < 0,001$ ). O consumo de O<sub>2</sub> variou de 0,23 a 0,44 mmol.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para o tratamento com o *H. australis* e de 0,64 a 1,32 mmol.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para o *L. culveri*. O consumo médio de O<sub>2</sub> de *L. culveri* foi três vezes superior ao de *H. australis* (figura 15A).

Não foram observados efeitos significativos quando a pressão parcial de CO<sub>2</sub> proveniente da respiração do macroinvertebrado foi analisada entre os tratamentos (Mann-Whitney  $p < 0,05$ ) ( $Z = 0,22$ ;  $p = 0,82$ ). A pCO<sub>2</sub> variou de -243,14 a 109.397,38 µatm.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para o tratamento com o *H. australis* e de 2.617,8 a 25.380,97 µatm.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> para *L. culveri* (figura 15B).

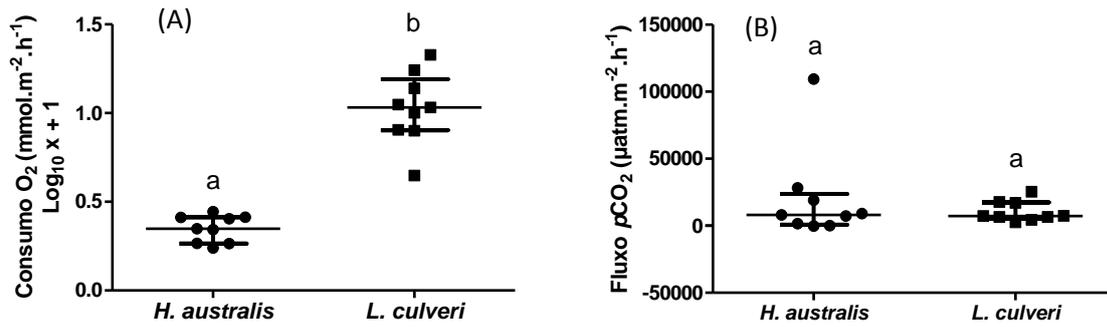


Figura 15: Resultados obtidos nos diferentes tratamentos no experimento de Respiração dos macroinvertebrados bentônicos descontando a média do tratamento controle. (A) Taxa de consumo de oxigênio; (B) Fluxo da pressão parcial de CO<sub>2</sub>. Os pontos representam os valores encontrados. Letras minúsculas diferentes indicam tratamentos acima dos valores estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ ). Em (A) as linhas horizontais centrais representam a média e as linhas inferior e superior representam o desvio padrão. Em (B) as linhas horizontais centrais representam a mediana e as linhas inferior e superior representam o intervalo interquartil.

## 6- DISCUSSÃO

### *Fluxos de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CID via biorrevolvimento de macroinvertebrados bentônicos*

Os resultados da presente pesquisa demonstram que o consumo de oxigênio dissolvido (O<sub>2</sub>) e os fluxos de carbono inorgânico na interface sedimento-água-atmosfera são afetados de maneira distinta pelo biorrevolvimento causado por macroinvertebrados bentônicos. O biorrevolvimento causado por *Laonereis culveri* intensificou os fluxos de CO<sub>2</sub> do sedimento para a água tornando-a saturada em relação atmosfera favorecendo a emissão deste para a atmosfera o que evidencia seu importante papel de remoção de CO<sub>2</sub> do sistema. Indivíduos da espécie *Heleobia australis* não causaram efeito sobre o consumo de O<sub>2</sub> e os fluxos de carbono inorgânico. Este fato reforça a proposta que macroinvertebrados bentônicos que cavam galerias e túneis no sedimento possuem maior efeito sobre fluxos de gases quando comparadas a outras espécies de macroinvertebrados. Este fato é comprovado quando é analisado o consumo de O<sub>2</sub> e fluxos de carbono inorgânico por peso seco das espécies estudadas sendo *L. culveri* com maior capacidade (por biomassa seca) de intensificar o consumo de O<sub>2</sub> (cerca de 8 vezes) e o fluxo de CO<sub>2</sub> (cerca de 11 vezes) em relação a *H. australis*.

Pesquisas realizadas por Kikuchi (1987) sugere que o tipo de colonização no sedimento pode ser responsável pela diferença na liberação de CO<sub>2</sub> observado quando comparamos diferentes espécies de macroinvertebrados bentônicos. Este autor estudou duas espécies de Polychaeta, *Notomastus sp.* e *Neanthes sp.*, e observou que a liberação de CO<sub>2</sub> foi maior nos tratamentos com *Notomastus sp.* Os tubos de *Notomastus* não são irrigados ativamente, resultando em uma menor difusão e penetração de O<sub>2</sub> com maior indução no fluxo de CO<sub>2</sub> acumulado na camada intersticial do sedimento. Já a espécie *Neanthes sp.* constrói tubos semi permanentes e coloniza a superfície do sedimento causando baixo efeito sobre o fluxo de CO<sub>2</sub>. O comportamento descrito para a espécie *Notomastus sp.* é semelhante aquele observado por *L. culveri*, onde esta espécie se deslocava livremente pelas camadas mais profundas do sedimento formando extensa rede de túneis, mas não continuamente. Assim, as elevadas taxas de liberação de CO<sub>2</sub> podem ser explicadas, conforme descrito por Kikuchi (1987). Leal *et al.* (2007), pesquisando o efeito do biorrevolvimento e da qualidade do sedimento sobre os fluxos de gases com a espécie *Campsurus notatus* (Ephemeroptera) observou que independente do

tipo de sedimento, natural ou impactado, o fluxo de CO<sub>2</sub> foi significativamente maior em tratamentos com a ninfa do Ephemeroptera em comparação com os tratamentos controle. Estes autores concluem que o modo de colonização desta espécie explica os resultados observados. A espécie *C. notatus* constroem túneis em forma de U ou J no sedimento e promovem fluxo de água nestes através da movimentação de projeções branquiais. Assim, o CO<sub>2</sub> acumulado na água intersticial do sedimento é deslocado para a coluna d'água por bombeamento aumentando sua concentração na água sobrejacente ao sedimento.

O consumo de O<sub>2</sub> e os fluxos positivos de CO<sub>2</sub> em todos os tratamentos (controle e com organismos) indicam a ocorrência de mineralização de matéria orgânica sedimentar. No entanto, os dados obtidos na presente pesquisa indicam um estímulo maior da mineralização da matéria orgânica no sedimento colonizado por *L. culveri*. Estes resultados corroboram com o que fora observado por outros autores em pesquisas em microcosmos em ecossistemas tropicais. Figueiredo-Barros (2004), em estudos com *Heleobia australis* (Gastropoda), *Heteromastus similis* (Polychaeta) e *Campsurus melanocephalus* (Ephemeroptera); Leal *et al.*, (2007) em estudos com *C. notatus* (Ephemeroptera) e Callisto *et al.*, (2009) em estudos com *Chironomus sp.* (Chironomidae) observaram intensificação de consumo de O<sub>2</sub> e fluxos de CO<sub>2</sub> através do biorrevolvimento. Neste sentido é importante ressaltar que a oxidação do metano (metanotrofia = consumo do metano por microorganismos), que tem como um dos produtos o CO<sub>2</sub>, é um processo que contribui com o aumento do estoque de CO<sub>2</sub> na água intersticial do sedimento e coluna d'água. Diversos autores tem destacado o importante papel dos macroinvertebrados como intensificadores da metanotrofia na interface sedimento-água (Figueiredo-Barros *et al.*, 2009; Gonçalves; 2013). Portanto, a intensificação da metanotrofia pode ser considerada como outro processo importante que também explica intensificação do fluxo de CO<sub>2</sub> na presença de determinadas espécies de macroinvertebrados.

Svensson (1998), em estudos que avaliaram o biorrevolvimento de duas espécies de macroinvertebrados concluiu que o consumo de O<sub>2</sub> pelo sedimento não pode ser explicado somente pelo efeito direto da fauna bentônica. O autor destaca que algumas espécies aumentam a atividade microbiológica no sedimento e conseqüentemente aumentam o consumo de O<sub>2</sub> e a produção de CO<sub>2</sub> devido ao estímulo a degradação da matéria orgânica dentro ou na parte externa das galerias formadas. Desta forma podemos propor que a intensificação do consumo de O<sub>2</sub> e liberação de carbono inorgânico causado somente por *L. culveri* está relacionado também ao aumento da degradação da matéria orgânica no interior e paredes dos túneis e galerias. Quando ocorre a construção de túneis e galerias, a área de interface sedimento-água mais que duplicam (Reise, 2002) e assim a decomposição é

intensificada. Além disso, podemos propor que a intensificação do consumo de  $O_2$  também pode estar relacionada ao consumo de  $O_2$  nas paredes das galerias onde a fêmea deposita seus ovos. Estes organismos produzem um muco na parede de suas galerias e mantêm este micro habitat irrigado através de movimentos ondulatórios de seus parapódios (Mazurkiewicz, 1975) podendo intensificar o consumo de  $O_2$  e bombeando carbono inorgânico dissolvido para a coluna d'água tornando-a ainda mais saturada de  $CO_2$ .

A respiração no sedimento pode ser indiretamente evidenciada nesta pesquisa através dos valores positivos de  $CO_2$  ( $pCO_2$  e CID) presentes nos tratamentos sem macroinvertebrados bentônicos (controle). Pesquisas realizadas em lagos de regiões temperadas indicam que na maior parte desses ecossistemas a  $pCO_2$  aumenta significativamente na água próximo ao sedimento. Tal resultado indica que os sedimentos são relevantes fontes de  $CO_2$  para a coluna d'água e que a respiração no sedimento é um dos principais fatores que contribuem para a supersaturação de  $CO_2$  observada nesses ambientes (Jonsson *et al.*, 2001; Kortelainen *et al.*, 2006). A presente pesquisa evidencia que apesar da importância do sedimento para a saturação de  $CO_2$  na coluna d'água *L. culveri* foi responsável por intensificar os fluxos de  $CO_2$  entre o sedimento e a água bem como da água para a atmosfera. Tais resultados demonstram a importância de algumas espécies de macroinvertebrados bentônicos para o estoque de carbono na coluna d'água. Além disso, esta espécie também intensifica as emissões de  $CO_2$  para a atmosfera o que demonstra seu importante papel na ciclagem do carbono.

Diversos autores vêm observando o efeito das espécies de macroinvertebrados bentônicos sobre os fluxos de  $CO_2$  do sedimento para a coluna d'água e o quanto este processo pode variar em função da identidade da espécie e da qualidade e característica do sedimento. Os diversos estudos com diferentes espécies concluem que as espécies que constroem túneis promovem maior intensidade de biorrevolvimento quando comparadas a espécies que colonizam a superfície como corroborado pela presente pesquisa. No entanto, os resultados da presente pesquisa sugerem que, além do efeito de espécies que constroem túneis sobre os fluxos de  $CO_2$  do sedimento para a água, o biorrevolvimento por determinada espécie (por exemplo, para *L. culveri*) intensifica a emissão de  $CO_2$  para a atmosfera (fluxo água-atmosfera). Apesar dos experimentos da presente pesquisa terem sido realizados em estruturas que comportam pequena coluna d'água e atmosfera, estes podem ser representativos considerando algumas lagoas costeiras da região norte fluminense visto que possuem baixas profundidades (Caliman *et al.*, 2010; Ferreira, 2012). Isto demonstra que os resultados, tanto para o  $CO_2$  na água, mas principalmente os de emissão de  $CO_2$  para a atmosfera podem ser

considerados plausíveis de ocorrerem nos ecossistemas. Assim, fica evidente que ecossistemas aquáticos colonizados pela espécie *L. culveri* podem ter a perda de carbono (emissão) para a atmosfera intensificada pelo biorrevolvimento. A atividade de *L. culveri* promoveu um incremento de CO<sub>2</sub> na atmosfera de aproximadamente 7,5 vezes em relação ao tratamento controle. Ao promover o fluxo de CO<sub>2</sub> do sedimento para a coluna d'água há uma saturação deste compartimento aumentando a emissão por difusão para a atmosfera. Este comportamento já fora descrito por Figueiredo-Barros *et al.*, (2009) estudando a espécie *Heteromastus similis* (Polychaeta) e Gonçalves (2013) em estudos com *L. culveri* e *Chironomus* sp. avaliando o fluxo de CH<sub>4</sub> em microcosmos. Desta forma fica evidente o importante papel de *L. culveri* sobre a intensificação dos fluxos de gases em ecossistemas aquáticos.

O padrão observado em relação aos fluxos de CID foi semelhante ao que fora encontrado para CO<sub>2</sub> onde somente *L. culveri* intensificou os fluxos do sedimento para a coluna d'água. Este resultado observado para CID reflete um importante papel ecológico que *L. culveri* pode exercer por intensificar a disponibilização de formas de carbono que são utilizadas por produtores primários, como por exemplo, bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Considerando que o pH da água utilizado nos experimentos foi em torno de 7, pode-se concluir que ocorre predomínio do íon bicarbonato. De acordo com Esteves (2011), o valor de pH do ecossistema altera a proporção das formas de carbono inorgânico - CO<sub>2</sub> livre e ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), carbonato (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) e bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Em pH abaixo de 6,4 predominam as formas de CO<sub>2</sub> livre e ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), entre 6,4 e 10,3 predomina o íon bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), e a partir de 10,3 predomina o íon carbonato (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>). Assim, *L. culveri*, através da sua atividade de biorrevolvimento, pode exercer papel central no funcionamento dos ecossistemas aquáticos pela intensificação dos fluxos de CO<sub>2</sub> (permitindo maior exportação para a atmosfera) e CID (permitindo o aumento de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> para produtores primários).

*Fluxos de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> via plâncton antes (experimento 2) e após (experimento 3) biorrevolvimento*

As incubações da água para determinar a contribuição do plâncton sobre o consumo de O<sub>2</sub> e produção de CO<sub>2</sub> demonstraram que a produção de CO<sub>2</sub> é ínfima e pouco contribui para o total de CO<sub>2</sub> presente na coluna d'água. Este fato indica que o sedimento é mais importante no fornecimento de CO<sub>2</sub> para a coluna d'água quando comparado ao que foi liberado pelo plâncton. No entanto, as incubações realizadas com a água dos microcosmos (representada

como incubação da água após término do experimento 1 = água submetida ao biorrevolvimento) demonstraram mais uma vez a baixa contribuição do plâncton no que se refere ao consumo de  $O_2$  e produção de  $CO_2$ . Além disso, foi possível observar no experimento 3 que o biorrevolvimento de ambas as espécies não causou intensificação tanto do consumo de  $O_2$  como produção de  $CO_2$  no plâncton. Isto indica que quase a totalidade de  $CO_2$  disponível na coluna d'água é oriunda de processos que ocorrem no sedimento sendo o fluxo intensificado quando na presença de *L. culveri*. Apesar do resultado da presente pesquisa indicar uma contribuição do plâncton para o estoque de  $CO_2$  na água, conforme observado por Tanaka *et al.*, (2012), o plâncton pouco contribui. Mesmo com a impossibilidade de comparação entre os fluxos de  $CO_2$  do experimento 1 com os outros experimentos devido a presença da atmosfera nos cores do experimento 1 é possível afirmar a baixa contribuição do plâncton para o estoque total de  $CO_2$ . Na água quando são comparados os valores iniciais e finais de  $CO_2$  da incubação dos experimentos 2 e 3 observamos baixo incremento deste  $CO_2$  reforçando que a liberação de  $CO_2$  via plâncton pouco contribui para o total.

#### *Fluxos de $O_2$ e $CO_2$ via metabolismo dos macroinvertebrados bentônicos*

Os resultados demonstram que apenas o consumo de  $O_2$  foi afetado pelos macroinvertebrados bentônicos. O Polychaeta *L. culveri* se mostrou mais efetivo no consumo do  $O_2$  comparado ao Gastropoda e ao tratamento controle. No entanto, este fato não refletiu em aumento da liberação de  $CO_2$  o que demonstra a baixa contribuição para o estoque de  $CO_2$  através do seu metabolismo. O resultado da presente pesquisa referente a liberação de  $CO_2$  via metabolismo do invertebrado é semelhante ao que foi observado por Quintana *et al.*, (2007) em estudos utilizando dois gêneros de Polychaeta (*Heteromastus* e *Marenzelleria*). Estes demonstraram consumo de  $O_2$  e fluxo de  $CO_2$  através da respiração destes organismos onde, apesar de possuir valores positivos de consumo e fluxo, a respiração contribui com valores ínfimos para o estoque de  $CO_2$ . A presente pesquisa indica que macroinvertebrados bentônicos produzem e liberam quantidades de C ínfimas na forma de  $CO_2$  para a água quando comparado a outras vias, como por exemplo, pelo biorrevolvimento. É esperado que sedimentos orgânicos, como os de ecossistemas lacustres, tenham relevada importância no fornecimento de  $CO_2$  para a coluna d'água devido a intensa atividade de decomposição e respiração. No entanto, há de se destacar que em diversas lagoas costeiras tropicais possuem elevadas densidades de macroinvertebrados bentônicos. Este fato poderia indicar alguma

importância da liberação e contribuição de CO<sub>2</sub> via metabolismo destes organismos para o ecossistema como um todo. Mas os resultados da presente pesquisa indicam que não há efeito significativo do metabolismo do invertebrado bentônico sobre o estoque de CO<sub>2</sub> na água. Assim, fica evidente que a importância destes macroinvertebrados neste sentido fica restrita ao efeito via biorrevolvimento e intensificação de processos transformadores do carbono orgânico em carbono inorgânico como, por exemplo, a mineralização da matéria orgânica.

### *Considerações Finais*

Ecossistemas aquáticos continentais costeiros são extremamente rasos e este fato permite concluir que os diversos processos que ocorrem no sedimento e sua interface com a coluna d'água exercem importante influência em toda a dinâmica e funcionamento destes ecossistemas. No caso das lagoas costeiras localizadas no PARNA Jurubatiba este fato é ainda mais evidente, principalmente para aquelas que não recebem águas de rios. Estes ecossistemas são depressões no terreno arenoso da restinga sendo preenchido por água da chuva, percolação e nascentes ao redor. Muitas das lagoas costeiras desta região possuem valores médios de profundidade reduzidos, variando entre 10 a 90 cm. Outro fato importante é que das 19 lagoas costeiras localizadas no PARNA Jurubatiba, 11 apresentaram o *Polychaeta L. culveri* (Ferreira, 2012) sendo o segundo grupo mais dominante em termos de densidade (Felix, 2012). Neste contexto, considerando os resultados da presente pesquisa, pode-se concluir que *L. culveri* é uma espécie fundamental no que diz respeito à intensificação da saturação de CO<sub>2</sub> dos ecossistemas lacustres localizadas no PARNA Jurubatiba por intensificar seu fluxo do sedimento para a coluna d'água. Segundo Laque (2012) as lagoas costeiras do PARNA Jurubatiba são supersaturadas em CO<sub>2</sub> sendo emissoras deste para a atmosfera. Os resultados da presente pesquisa sugerem que esta característica pode ser em grande parte atribuída ao fluxo de CO<sub>2</sub> do sedimento para a coluna d'água (como observado para os tratamentos sem organismos) e intensificado pela presença de *L. culveri*.

O entendimento de todas as vias e mecanismos de transformações do carbono é essencial para a avaliação do funcionamento dos ecossistemas aquáticos e ainda para o balanço global de carbono. Alguns autores sugerem que as mais importantes causas da supersaturação em CO<sub>2</sub> observada na maioria dos lagos do mundo são diversas, dentre elas estão a respiração bacteriana na água e no sedimento (Tranvik, 1988; Jonsson *et al.*, 2001). Atualmente com o aumento das discussões sobre o ciclo do carbono devido ao tema “mudanças climáticas”, cada via deste ciclo tem recebido maior atenção e seus estudos

intensificados. Neste sentido os resultados da presente pesquisa reforçam que a interface sedimento-água e a fauna bentônica podem ter papel crucial nos fluxos entre os compartimentos aquáticos. No entanto, o papel do compartimento bentônico sobre o ciclo do carbono pode variar em diversos aspectos como característica do ecossistema, sedimento, profundidade da coluna d'água, biota, entre outros. Na presente pesquisa pode-se sugerir que, além das características físicas e químicas, a identidade da espécie que coloniza o sedimento pode promover efeitos distintos como foi observado quando comparamos as espécies *H. australis* e *L. culveri*, sendo a última a que causou maior efeito sobre os fluxos de CO<sub>2</sub> e CID. Este fato indica que *L. culveri* pode ser considerada como uma espécie chave no que diz respeito à remoção de carbono inorgânico do sedimento para água e atmosfera.

Os resultados encontrados demonstram que as espécies de macroinvertebrados bentônicos podem alterar de forma distinta os fluxos de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CID na interface sedimento-água-atmosfera. Neste contexto, fica evidente que o modo de colonização no sedimento por *H. australis* e *L. culveri* pode explicar as diferenças encontradas. Diversos autores vêm demonstrando a importância da identidade das espécies de macroinvertebrados bentônicos sobre diversos processos ecológicos sendo as que constroem túneis as maiores intensificadoras destes. Estudo realizado por Caliman *et al.*, (2012) utilizando microcosmos e as espécies de macroinvertebrados bentônicos *Chironomus sp.*, *H. similis* e *H. australis*, demonstraram que estas espécies colonizam o sedimento de forma distinta e, desta forma, não exercem a mesma influência sobre os fluxos de nutrientes na interface sedimento-água. Ao estudar os perfis de oxi-redução sob influência de cinco espécies de macroinvertebrados bentônicos, Hunting *et al.* (2012) observaram efeitos distintos para espécies que apresentaram modos de colonização diferentes. A presente pesquisa corrobora o que vem sendo encontrado por outros autores no que se refere aos diferentes efeitos da fauna em função da maneira de colonizar o sedimento e evidencia a importância de *L. culveri*, uma espécie de Polychaeta, sobre o ciclo do carbono e para a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

## 7- CONCLUSÕES

- Espécies de macroinvertebrados bentônicos alteram a concentração de CO<sub>2</sub> nos compartimentos água e atmosfera. A estratégia de colonizar o sedimento das espécies estudadas foi o fator determinante para diferentes concentrações de CO<sub>2</sub> observadas.

- Espécies que formam galerias influenciam de forma distinta as concentrações de CO<sub>2</sub> nas interfaces sedimento-água-atmosfera. A característica de cada espécie permite maior ou menor intensidade de diferentes processos. *Laonereis culveri* intensifica os fluxos de CO<sub>2</sub> do sedimento para a coluna d'água e desta para a atmosfera, enquanto o *Heleobia australis* não possui efeitos significativos nestes processos.

- O metabolismo dos invertebrados bentônicos, através de sua respiração, não apresentou efeito significativo sobre o estoque de CO<sub>2</sub> na água, enquanto que sua forma de colonizar o sedimento se mostrou importante intensificador deste processo.

- Macroinvertebrados bentônicos são importantes componentes influenciadores nos processos de transformação do carbono no ecossistema aquático, contribuindo de forma efetiva para o funcionamento dos ecossistemas aquáticos.

## 8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aller, R. C. & Aller, J. Y. 1998. The effect of biogenic irrigation intensity and solute exchange on diagenetic reaction rates in marine sediments. *Journal Marine Research*, 56: 905-936.
- Ambühl, H. & Bühner, H. 1975. Technik der Entnahme ungestörter Grossproben von Seesedimenten: ein verbessertes Bohrlot. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, 37: 175-186.
- Bartoli, M.; Nizzoli, D.; Welsh, D. T.; Viaroli, P. 2000. Short-term influence of recolonisation by the polychaete worm *Nereis succinea* on oxygen and nitrogen fluxes and denitrification: a microcosm simulation. *Hydrobiologia*, 431:165-174.
- Briand, E.; Pringault, O.; Jacquet, S.; Torreton, J. P. 2004. The use of oxygen microprobes to measure bacterial respiration for determining bacterioplankton growth efficiency. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2: 406-416.
- Brodersen, K. P.; Pedersen, O.; Walker, I. R.; Jensen, M. T. 2008. Respiration of midges (Diptera; Chironomidae) in British Columbian lakes: oxy-regulation, temperature and their role as palaeo-indicators. *Freshwater Biology*, 53: 593-602.
- Brune, A.; Frenzel, P.; Cypionka, H. 2000. Life at the oxic-anoxic interface: microbial activities and adaptations. *Fems Microbiology Reviews*, 24: 691-710.
- Caliman, A.; Carneiro, L. S.; Leal, J. J. F.; Bozelli, R. L.; Esteves, F. A.; Farjalla, V. F. 2007. Functional bioturbator diversity enhances benthic-pelagic processes and properties in experimental microcosms. *Journal of the North American Benthological Society*, 26: 450-459.
- Caliman, A.; Carneiro, L. S.; Santangelo, J. M.; Guariento, R. D.; Pires, A. P. F.; Suhett, A. L.; Quesado, L. B.; Scofield, V.; Fonte, E. S.; Lopes, P. M.; Sanches, L. F.; Azevedo, F. D.; Marinho, C. C.; Bozelli, R. L.; Esteves, F. A.; Farjalla, V. F. 2010. Temporal coherence among tropical coastal lagoons: a search for patterns and mechanisms. *J. Biol.*, 70: 803-814.
- Caliman, A.; Carneiro, L. S.; Leal, J. J. F.; Farjalla, V. F.; Bozelli, R. L.; Esteves, F. A. 2012. Community Biomass and Bottom up Multivariate Nutrient Complementarity Mediate the Effects of Bioturbator Diversity on Pelagic Production. *Plos One*, Vol. 7.

- Callisto, M.; Leal, J. J. F.; Figueiredo-Barros, M. P.; Moreno, P.; Esteves, F. A. 2009. Effect of bioturbation by chironomus on nutrient fluxes in an urban eutrophic reservoir. 7th ISE & 8th HIC - Chile.
- Carmouze, J. P. 1994. O metabolismo dos ecossistemas aquáticos: fundamentos teóricos, métodos de estudo e análises químicas. Edgard Blücher e FAPESP, São Paulo.
- Cole, J. J. & Caraco, N. F. 1998. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF<sub>6</sub>. *Limnology and Oceanography*, 43: 647-656.
- Cole, J. J.; Caraco, N. F.; Kling, G. W.; Kratz, T. K. 1994. Carbon-Dioxide Supersaturation in the Surface Waters of Lakes. *Science*, 265: 1568-1570.
- Dalsgaard, T.; Nielsen, L. P.; Brotas, V.; Viaroli, P.; Underwood, G.; Nedwell, D. B.; Sundbäck, K.; Rysgaard, S.; Miles, A.; Bartoli, M.; Dong, L.; Thornton, D. C. O.; Ottosen, L. D. M.; Castaldelli, G.; Risgaard-Petersen, N. 2000. Protocol handbook for NICE - Nitrogen Cycling in Estuaries: a project under the EU research programme. Silkeborg, Denmark, Marine Science and Technology (MAST III). National Environmental Research Institute.
- del Giorgio, P. A.; Cole, J. J.; Cimbleris, A. 1997. Respiration rates in bacteria exceed plankton production in unproductive aquatic systems. *Nature*, 385: 148-51.
- Emmerson, M. C.; Solan, M.; Emes, C.; Paterson, D. M.; Raffaelli, D. 2001. Consistent patterns and the idiosyncratic effects of biodiversity in marine ecosystems. *Nature*, 411(6833): 73-77.
- Esselink, P. & Zwarts, L. 1989. Seasonal trend in burrow depth and tidal variation in feeding activity of *Nereis diversicolor*. *Marine Ecology Progress Series*, 56: 243-254.
- Esteves, F. A. 2011. Fundamentos de Limnologia, 3<sup>a</sup>. ed. Interciência, Rio de Janeiro.
- Felix, R. W. 2012. Estrutura e Distribuição da Comunidade de Macroinvertebrados Bentônicos em Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, RJ. Monografia – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ.

- Fenchel, T.; King, G. M.; Blackburn, T. H. 1998. *Bacterial Biogeochemistry: The Ecophysiology of Mineral Cycling*. Academic Press.
- Ferreira, B. C. A. 2012. *Taxonomia e Distribuição de Polychaeta nas Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, RJ – Brasil*. Dissertação de Mestrado em Zoologia – Museu Nacional – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Figueiredo-Barros, M. P. 2004. *Bioturbação na interface sedimento-água por três espécies de macroinvertebrados bentônicos com ênfase na ciclagem de nutrientes*. Dissertação de Mestrado - Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Figueiredo-Barros, M. P.; Caliman, A.; Leal, J. J. F.; Bozelli, R. L.; Farjalla, V. F.; Esteves, F. A. 2009. Benthic bioturbator enhances CH<sub>4</sub> fluxes among aquatic compartments and atmosphere in experimental microcosms. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 66: 1649-1657.
- Gonçalves, F. A. 2013. *Efeito do biorrevolvimento por macroinvertebrados bentônicos sobre a concentração de metano (CH<sub>4</sub>) na interface sedimento – água – atmosfera*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais e Conservação NUPEM – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, RJ.
- Graneli, W.; Lindell, M.; Tranvik, L. 1996. Photo-oxidative production of dissolved inorganic carbon in lakes of different humic content. *Limnology and Oceanography*, 41: 698-706.
- Heilskov, A. C. & Holmer, M. 2001. Effects of benthic fauna on organic matter mineralization in fish-farm sediments: importance of size and abundance. *ICES Journal of Marine Science*, 58: 427-434.
- Hesslein, R. H.; Rudd, J. W. M.; Kelly, C.; Ramlal, P.; Hallard, A. 1991. Carbon dioxide pressure in surface waters of Canadian Lakes. *In: Wilhelms, S. C. & J. Gulliver, J. S. (1991), Air-water mass transfer*, American Society of Civil Engineers, Washington.
- Hunting, E. R.; Whatley, M. H.; van der Geest, H. G.; Mulder, C.; Kraak, M. H. S.; Breure, A. M.; Admiraal, W. 2012. Invertebrate footprints on detritus processing, bacterial community structure, and spatiotemporal redox profiles. *Freshwater Science*, 31(3): 724-732.

- IPCC, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C. B.; Barros, V.; Stocker, T. F.; Qin, D.; Dokken, D. J.; Ebi, K. L.; Mastrandrea, M. D.; Mach, K. J.; Plattner, G. K.; Allen, S. K.; Tignor, M.; Midgley, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- Jager, I. S. & Walz, N. 2002. *Chaoborus flavicans* (Diptera) is an oxy-regulator. *Archiv fur Hydrobiologie*, 155: 401-411.
- Jackson, M. L. 1962. Soil Chemical analysis. Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- Jonsson, A.; Meili, M.; Bergström, A. K.; Jansson, M. 2001. Whole lake mineralization of allochthonous and autochthonous organic carbon in a large humic lake (Ortrasket, N. Sweden). *Limnology and Oceanography*, 46(7): 1691-1700.
- Kikuchi, E. 1987. Effects of the Brackish Deposit-Feeding Polychaetes *Notomastus* sp. (Capitellidae) and *Neanthes japonica* (Izuka) (Nereidae) on Sedimentary O<sub>2</sub> Consumption and CO<sub>2</sub> Production-Rates. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 114:15-25.
- King, G. M. 2005. Ecophysiology of microbial respiration. *In*: del Giorgio, P. A. & Williams, P. J. B. *Respiration in aquatic ecosystems*. Oxford University Press.
- Kortelainen, P.; Rantakari, M.; Huttunen, J. T.; Mattsson, T.; Alm, J.; Juutinen, S.; Larmola, T.; Silvola, J.; Martikainen, P. J. 2006. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO<sub>2</sub> evasion from small boreal lakes. *Global Change Biology*, 12:1554-1567.
- Kristensen, E. 1985. Oxygen and Inorganic Nitrogen Exchange in a *Nereis virens* (Polychaeta) Bioturbated Sediment-Water System. *Journal of Coastal Research*, 1: 109-116.
- Kristensen, E. 2000. Organic matter diagenesis at the oxic/anoxic interface in coastal marine sediments, with emphasis on the role of burrowing animals. *Hydrobiologia*, 426: 1-24.

- Kristensen, E.; Penha-Lopes, G.; Delefosse, M.; Valdemarsen, T.; Quintana, C. O.; Banta, G. T. 2012. What is bioturbation? The need for a precise definition for fauna in aquatic sciences. *Marine Ecology Progress Series*, 446: 285-302.
- Laque, T. 2012. Saturação de CO<sub>2</sub> e seus fatores reguladores em lagoas costeiras tropicais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ecologia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Leal, J. J. F.; Esteves, F. D.; Farjalla, V. F.; Enrich-Prast, A. 2003. Effect of *Campsurus notatus* on NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, DOC fluxes, O<sub>2</sub><sup>-</sup> uptake and bacterioplankton production in experimental microcosms with sediment-water interface of an Amazonian lake impacted by bauxite tailings. *International Review of Hydrobiology*, 88: 167-178.
- Leal, J. J. F.; Furtado, A. L. D.; Esteves, F. D.; Bozelli, R. L.; Figueiredo-Barros, M. P. 2007. The role of *Campsurus notatus* (Ephemeroptera : Polymitarcyidae) bioturbation and sediment quality on potential gas fluxes in a tropical lake. *Hydrobiologia*, 586: 143-154.
- Mazurkiewicz, M. 1975. Larval development and habits of *Laeonereis culveri* (Webster) (Polychaeta : Nereidae). *Biological Bulletin*, 149: 186-204.
- Meysman, F.; Middelburg, J.; Heip, C. 2006. Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea. *Trends in Ecology & Evolution*, 21: 688-695.
- Mulsow, S.; Boudreau, B. P.; Smith, J. N. 1998. Bioturbation and porosity gradients. *Limnology and Oceanography*, 43: 1-9.
- Odum, H. T. 1956. Primary production in flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 1: 102-117.
- Pace, M. L. & Prairie, Y. T. 2005. Respiration in lakes. *In*: del Giorgio, P. A. & Williams, P. J. B. (eds) *Respiration in aquatic ecosystems*. Oxford University Press, New York.
- Pettibone, M. H. 1971. Revision of some species referred to *Leptonereis*, *Nicon* and *Laeonereis* (Polychaeta: Nereididae). *Smithsonian Contributions to Zoology*, Washington, 104: 53.
- Pohle, B. & Hamburger, K. 2005. Respiratory adaptations to oxygen lack in three species of Glossiphoniidae (Hirudinea) in Lake Esrom, Denmark. *Limnologica*, 35: 78-89.

- Prairie, Y. T. 2008. Carbocentric limnology: looking back, looking forward. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 65: 543-548.
- Quintana, C. O.; Tang, M.; Kristensen, E. 2007. Simultaneous study of particle reworking, irrigation transport and reaction rates in sediment bioturbated by the polychaetes *Heteromastus* and *Marenzelleria*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 352: 392-406.
- Raven, P. H.; Evert, R. F.; Eichorn, S. E. 2007. *Biologia Vegetal*. 7<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.
- Reise K. 2002. Sediment mediated species interactions in coastal waters. *Journal of Sea Research*, 48, 127-141.
- Sobek, S.; Tranvik, L. J.; Cole, J. J. 2005. Temperature independence of carbon dioxide supersaturation in global lakes. *Global Biogeochemistry*, 19: 1-10.
- StatSoft, INC., 2007, Statistica (data analysis software system). Version 8.0. Available at://www.statsoft.com.
- Suguio, K. 1973. *Introdução a sedimentologia*. Ed. Edgar Buckler, EDUSP, São Paulo, 317p.
- Svensson, J. & Leonardson, L. 1996. Effects of bioturbation by tube-dwelling chironomid larvae on oxygen uptake and denitrification in eutrophic lake sediments. *Freshwater Biology*, 35:289-300.
- Svensson, J. M. 1998. The role of benthic macrofauna on nitrogen cycling in eutrophic lake sediment. *In: Department of Ecology. Lund University, Lund*, p. 47.
- Tanaka, T.; Alliouane, S.; Bellerby, R. G. J.; Czerny, J.; de Kluijver, A.; Riebesell, U.; Schulz, K. G.; Silyakova, A.; Gattuso, J. P. 2012. Metabolic balance of a plankton community in a pelagic water of a northern high latitude fjord in response to increased  $p\text{CO}_2$ . *Biogeosciences Discuss.*, 9: 11013-11039.
- Tessenow, U. 1964. Experimental unter suchungen zur Kieselsaurerückführung aus dem Schlamm der Seen durch Chironomidenlarven (Plumosus-Gruppe). *In: Graneli, W. 1979b. The Influence of Chironomus plumosus Larvae on the Exchange of Dissolved Substances between Sediment and Water. Hydrobiologia*, 66:149-159.

- Tranvik, L. J. 1988. Availability of dissolved organic carbon for planktonic bacteria in oligotrophic lakes of differing humic content. *Microbial Ecology*, 16: 311-322.
- Ungemach, H. 1960. Sediment Chemismus und seine Beziehung zum Stoffhaushalt in 40 europäischen Seen. Universität Kiel, Germany. 420p.
- Zinder, S. H. 1993. Physiological ecology of methanogens. *In: Methanogenesis: Ecology, Physiology, Biochemistry & Genetics* (ed. G. FJ). Chapman & Hall Inc., pp. 128-206. New York. 536 p.