

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**METABOLISMO MEDIADO PELO BACTERIOPLÂNCTON EM UM LAGO RASO  
SUBTROPICAL E SUA RELAÇÃO COM A PRESENÇA DE MACRÓFITAS,  
SEDIMENTO E REGIME HÍDRICO**

**ELIETE REGINA BERTAZZO CANTERLE**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

**Orientador: David da Motta Marques**

**Banca Examinadora**

Dr. Bias Marçal de Faria – CENPES/PETROBRÁS

Profª Dra. Gertrudes Corção - Departamento de Microbiologia - UFRGS

Prof. Dr. Albano Schwarzbald - Departamento de Ecologia – UFRGS

Prof. Dr. Walter Collischonn – Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS

Porto Alegre, junho de 2011

**METABOLISMO MEDIADO PELO BACTERIOPLÂNCTON EM UM LAGO RASO  
SUBTROPICAL E SUA RELAÇÃO COM A PRESENÇA DE MACRÓFITAS,  
SEDIMENTO E REGIME HÍDRICO**

**ELIETE REGINA BERTAZZO CANTERLE**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental  
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
como requisito parcial para a obtenção do título  
de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento  
Ambiental.

Banca Examinadora

---

Professor e orientador David da Motta Marques, PhD/DIC  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas

---

Dr. Bias Marçal de Faria  
CENPES /PETROBRÁS

---

Profª Dra. Gertrudes Corção  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Microbiologia

---

Prof. Dr. Albano Schwarzbald  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Departamento de Ecologia

---

Prof. Dr. Walter Collischonn  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas

“Quem passou a vida em brancas nuvens  
E em plácido repouso adormeceu,  
Quem não sentiu o frio da desgraça,  
Quem passou pela vida e não sofreu  
Foi espectro de homem, não foi homem,  
Só passou pela vida, não viveu.”

*Francisco Octaviano*

*Dedico aos meus pais,  
exemplos de caráter e determinação,  
e que infelizmente partiram sem ver a conclusão desse trabalho...*

## **AGRADECIMENTOS**

### **Gostaria de externar meus sinceros agradecimentos:**

Ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao CNPq, órgão financiador do projeto PELD (Sistema Hidrológico do Taim, Sítio 7), no qual meu projeto está inserido, e pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Instituto Federal Sul-Riograndense (IF Sul), do qual faço parte do quadro de professores, e permitiu meu afastamento para realização desse trabalho.

Ao Prof. David da Motta Marques pela confiança, orientação, infra-estrutura, compartilhamento de conhecimentos, oportunidades de trilhar novos horizontes e pelas possibilidades de realização de um trabalho cada vez melhor.

Aos profs. Dionéia Cesar e Fabio Roland, que gentilmente me acolheram no Laboratório de Ecologia Aquática do Departamento de Biologia /ICB –UFJF, e compartilharam comigo seus conhecimentos sobre o “mundo invisível” dos procariotos! Obrigada pela disponibilidade e atenção.

Aos integrantes do Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal de Juiz de Fora, Alessandro, Eliéze, Lúcia, Luciana, Simone e demais alunos. Vocês foram muito generosos na acolhida e no treinamento das metodologias.

À amiga Dionéia Cesar que me guiou e hospedou em sua residência durante minha estadia em Juiz de Fora, muito obrigada!

Ao prof. Lars Tranvik, da Universidade de Uppsala – Suécia - pela possibilidade de intercâmbio no seu laboratório e pela atenção e conhecimento compartilhados durante minha estadia naquela Universidade.

Às grandes colegas de laboratório e amigas, Lúcia Rodrigues e Vanessa Becker, parceiras de todas as horas, que me auxiliaram inúmeras vezes, abriram mão de seu tempo para me ouvir

outras tantas, e que muito gentilmente me hospedaram nas suas casas em várias ocasiões, além das muitas caronas, é claro! Meu agradecimento de coração!

Ao Haig They que generosamente compartilhou sua companhia e paciência no processo de implantação dos métodos bacterianos, além do domínio do Image Tool!!

À Simone Oliveira, pela boa vontade em auxiliar e fornecer dicas durante o processo de implementação da metodologia do FISH e na solução de outras dúvidas, sempre com um sorriso e disposição.

Aos queridos colegas e parceiros do grupo de pesquisa Lúcia Rodrigues, Vanessa Becker, Carlos Ruberto Fragoso Junior, Luciana Cardoso, Luciane Crossetti, Luciana Costa, Tiago Finkler Ferreira, Maria Angélica Cardoso, Rafael Souza, Fábio Pereira, Mino Sorribas, Marla Lima e Danieli Kist, pela convivência e ajuda nos momentos de dúvida.

À Christiane dos Santos, pelo auxílio nas análises químicas e no trabalho com o sedimento, e pela alegria e otimismo que sempre partilhou com os demais no dia-a-dia muitas vezes duríssimo de nossa jornada.

Aos bolsistas Juliana Zanoteli, Betina Marks, Sílvia Ramos, Danieli Kist, Daniela Bes, Ilka Sant'Ana, Ricardo, Douglas Rouble, Leonardo Dias, Lorenzo Pacheco, e aos estagiários Kamila Rosa e Christiane dos Santos, obrigada pelo empenho e pela divisão do trabalho braçal.

Aos técnicos Álvaro Frantz, Antônio Bueno, Ivanir D'Ávila e Mara Domingues pela convivência, amizade, ajuda nas análises físico-químicas, nas atividades em campo e em outras tantas dúvidas sanadas.

Ao Prof. Dr. Luiz Kucharski, do Departamento de Fisiologia da UFRGS, pelo empréstimo do cintilador que nos permitiu realizar parte do trabalho com os métodos radioativos, e pela gentileza sempre presente.

Às amigas Lúcia Rodrigues, Simone Oliveira, Viviane Juliano, Andrea Castro, Andréia Sanches e Viviane Trevisan pelos inúmeros encontros regados à gargalhadas. Valeu mulherada!

A todos àqueles que, mesmo não nominados, contribuíram para a concretização desse trabalho.

Meu agradecimento especial a duas pessoas especiais: Bernardo e Túlio. Sem o apoio de vocês simplesmente não seria possível a realização desse trabalho.

## RESUMO

O Sistema Hidrológico do Taim é um sistema subtropical raso formado por um gradiente de terras úmidas e lagoas associadas, localizado no sul do Brasil. Esse sistema apresenta uma grande variação sazonal no nível d'água, que se relaciona com a presença de macrófitas aquáticas e a distribuição espacial das mesmas. As macrófitas aquáticas são elementos importantes na estruturação de lagos rasos subtropicais e, junto com o fitoplâncton e matéria orgânica alóctone, favorecem o desenvolvimento do bacterioplâncton. Esses microrganismos são considerados elementos extremamente importantes para esses ecossistemas, em função de seu papel na decomposição de material orgânico e na remineralização de nutrientes inorgânicos, participando da ciclagem biogeoquímica, bem como da transferência de matéria e energia para os níveis tróficos superiores através da chamada alça microbiana. Em função do exposto, o presente trabalho foi desenvolvido a partir de abordagens que se referem ao compartimento sedimento de um banhado temporário (rice fields) no que tange à produção de gases de efeito estufa, e ao metabolismo da coluna d'água e da interface água/sedimento, a partir da utilização de experimentos em mesocosmos. Portanto, esse estudo tem como objetivo analisar os processos metabólicos que ocorrem na coluna d'água e na interface água-sedimento e no sedimento de uma área úmida subtropical, associados à dinâmica do bacterioplâncton e relacionados à diferentes variáveis, como a oscilação do nível de água, a espessura da coluna de sedimento, a quantidade de biomassa vegetal, bem como o tipo de macrófita predominante. Nossos resultados evidenciaram que o metabolismo dos ecossistemas rasos subtropicais pode ser afetado de diferentes formas pelas variáveis que atuam nos diferentes compartimentos analisados. A presença de diferentes tipos de macrófitas (*Zizianopsis bonairensis* e *Schoenoplectus californicus* (emergentes), *Myriophyllum aquaticum* e *Potamogeton illinoensis* (submersas), e *Salvinia herzogii* e *Pistia stratiotes* (macrófitas flutuantes)) e de diferentes regimes hídricos levaram a uma redução nos valores de densidade, de biomassa e de produção bacteriana, especialmente na presença de macrófitas emersas, ao contrário da presença de macrófitas submersas e flutuantes, no regime de baixo nível d'água, onde essa redução foi menos acentuada. Da mesma forma, a quantidade de biomassa de uma macrófita submersa (*Potamogeton illinoensis*), e as variáveis relacionadas à qualidade do carbono decorrente dessa biomassa, como absorvância específica do COD, COD, CT e a razão de substâncias húmicas, além de diferenças na altura da lâmina d'água, foram fatores determinantes na dinâmica do bacterioplâncton, elevando os valores de densidade e biomassa bacteriana, e reduzindo a produção secundária, nessas condições. Por outro lado, na ausência de macrófitas e na presença de diferentes espessuras de sedimento, os nutrientes, especialmente as formas fosfatadas, e a concentração de diferentes formas de carbono, foram relacionadas a alterações nos valores observados para densidade, biomassa e produção bacteriana, além de levar a mudança nos diferentes grupos que formam a comunidade do bacterioplâncton. Assim, ao longo do experimento, a comunidade *Bacteria* (grupos *Bacteria*,  $\alpha$ -*Proteobacteria*,  $\beta$ -*Proteobacteria* e *Firmicutes*) diminuiu a densidade de seus grupos específicos, sendo substituída pelo aumento de densidade dos organismos do domínio *Archaea* (*Archaea*, *Methanogênicas*, *Metanotróficas* aeróbicas e anaeróbicas, *Beta-AOB* e *Nitrato-oxidantes*). A morfotipagem bacteriana também foi afetada frente às diferentes variáveis ambientais analisadas, levando à alteração do predomínio e da densidade das formas *coccus* - *regular rod* - *curved rod* normalmente observados, possivelmente como forma de adequação celular frente à disponibilidade de recursos e pressão de predação. Da mesma forma, em banhados temporários subtropicais, as condições de alagamento típicas de um ciclo de cultivo resultaram em variações espaciais e temporais na produção de gases de efeito estufa, como CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, mostrando que estes locais são emissores potenciais de gases de efeito estufa, mesmo que em determinadas épocas do ano. Assim, aspectos como a densidade, a biomassa, a morfologia, a atividade e os grupos da comunidade do bacterioplâncton, além da



produção de gases de efeito estufa, apresentaram comportamento distinto, relacionado às diferentes variáveis que foram determinantes nas diferentes situações ambientais destacadas neste estudo. Os dados obtidos permitem um melhor entendimento a respeito do metabolismo mediado pelo bacterioplâncton em ecossistemas rasos subtropicais, e podem ser utilizados como ferramenta para a previsão de processos metabólicos geradores de alterações do estado do ecossistema, principalmente quando submetidos à estressores, sejam naturais ou antrópicos.

**Palavras chave:** ecossistemas rasos subtropicais, macrófitas aquáticas, biomassa de macrófitas, regime hídrico, bacterioplâncton, dinâmica do bacterioplâncton, morfotipos bacterianos, comunidade bacteriana, banhados temporários, sedimento, interface água/sedimento, gases de efeito estufa.

## ABSTRACT

The Taim Hidrologic System is a subtropical shallow system formed by a gradient of associated lakes and wetlands, located in Southern Brazil. This system presents a high seasonal variation in water level, which is related with the presence of aquatic macrophytes and their spatial distribution. The aquatic macrophytes are important in the structuring of subtropical shallow lakes and, together with phytoplankton and allochthonous organic matter, support the growth of bacterioplankton. These microorganisms are considered an important component for aquatic ecosystems, due to their role in the organic matter decomposition and the remineralization of inorganic nutrients, participating in the biogeochemical cycles and the transference of matter and energy for the high trophic levels, in aquatic ecosystems, through the microbial loop. Given the facts presented, this work was developed in accordance with approaches related to the pool sediment of a wetland temporary (rice fields) regarding the greenhouse gases production, the metabolism of the water column and the water/sediment interface, involving the use of experiments in mesocosms. Therefore, the aim of this study was to analyze the metabolic processes that occur in the water column, at water-sediment interface and in sediment of a subtropical shallow area, associated to the bacterioplankton dynamic and related to different variables, including the oscillation of the water levels, the thickness of the sediment layer, the quantity of macrophyte biomass and the predominant type of macrophyte. Analysis of the results showed that the metabolism of the subtropical shallow ecosystems can be affected in different ways by the variables that act at the different pools analyzed. The presence of different macrophyte types (*Zizianopsis bonairensis* and *Schoenoplectus californicus* (emergent), *Myriophyllum aquaticum* and *Potamogeton illinoensis* (submerged), and *Salvinia herzogii* and *Pistia stratiotes* (free-floating macrophyte)) and of different water regimes caused a decrease in bacterial density, biomass and bacterial production, particularly in the presence of emerged macrophytes, in contrast to the presence of submerged and free-floating macrophytes at the low water level, where this decrease was less accentuated. Similarly, the biomass of a submerged macrophyte (*Potamogeton illinoensis*), and the variables related to carbon quality, such as dissolved organic carbon (DOC) specific absorbance, DOC, total carbon (TC) and humic substances (HS) ratio, and differences in the water levels, were determining factors in the bacterioplankton dynamic that increased bacterial density and biomass, and decreased secondary production under these conditions. On the other hand, in the absence of macrophytes and in the presence of the different thicknesses of sediment layers, the concentrations of nutrients, particularly the phosphorus forms, and carbon were related to alterations in the values observed to bacterial density, biomass and bacterial activity, as well as promoting changes in the different groups at the bacterial community level. Thus, throughout the experiment, a decrease in the density of specific groups in the *Bacteria* community (most *Bacteria*,  $\alpha$ -*Proteobacteria*,  $\beta$ -*Proteobacteria* and *Firmicutes* groups) occurred, which were replaced by an increase in the density of organisms of the *Archaea* domain (most *Archaea*, *Methanogenics*, aerobic and anaerobic *Metanotrophs*, *Beta-AOB* and *Nitrite-oxidants* groups). Similarly, the bacterial morphotype was affected by the different environmental variables analyzed, promoting alterations to the predominance and density of the *coccus* - *regular rod* - *curved rod* forms normally observed, probably due to a cellular adaptation strategy caused by the resources availability and of predation pressure. Similarly, in subtropical temporary wetland, the conditions of typical flooding of a cultivation cycle (rice field) resulted in spatial and seasonal variations in the greenhouse gases production, such as CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>, showing that these areas are potential sites of greenhouse gas emissions, though in determined periods of the year. Therefore, aspects that include the bacterial density and biomass, bacterial morphology, bacterial activity and the groups of bacterioplankton communities and the production of greenhouse gases showed a diverse behavior associated with the variables that were determinants in the different

environmental situations highlighted in this study. This study can provide information and contribute to current understanding regarding the metabolism mediated by bacterioplankton in subtropical shallow ecosystems, and how shallow lakes act in response when submitted to natural and anthropogenic stressors.

Keywords: subtropical shallow ecosystems, aquatic macrophytes, biomass macrophyte, water regime, bacterioplankton, bacterioplankton dynamics, bacterial morphotypes, bacterial community, temporary wetlands, sediment, water/sediment interface, greenhouse gases.

## APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido junto ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sob orientação do professor David da Motta Marques.

O estudo desenvolvido nesta Tese de Doutorado faz parte do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) - Sistema Hidrológico do Taim – Sítio 7, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Promover a consolidação do conhecimento existente sobre a composição e o funcionamento dos ecossistemas brasileiros e gerar informações e subsídios para avaliação da diversidade física e biológica dos mesmos são objetivos do PELD/CNPq. Deste modo, o PELD é um programa composto por uma rede de diferentes sistemas que representam os principais ecossistemas brasileiros, oferecendo suporte logístico, tecnológico e científico, e visando a pesquisa integrada nos diferentes sítios de modo que resultem em formas mais adequadas de gerenciamento desses ecossistemas. No caso do Sítio 7, que engloba o Sistema Hidrológico do Taim, o foco se dirige à integração de processos hidrodinâmicos que atuam em conjunto com os diferentes níveis tróficos, especialmente no subsistema Mangueira, um lago raso subtropical.

Esta tese abordou processos metabólicos que ocorrem na coluna d'água e no sedimento de um ecossistema raso subtropical (Lagoa Mangueira), através da utilização de experimentos em mesocosmos e associando fatores potencialmente capazes de influenciar esses processos, seja de forma isolada ou conjuntamente, nas diferentes fases do hidroperíodo pelas quais o sistema é submetido. Assim, o sedimento, macrófitas flutuantes, submersas e emergentes, bem como a biomassa de uma macrófita emergente, foram associados a diferentes níveis de água, visando um melhor entendimento desses processos. Da mesma forma, a dinâmica e a comunidade do bacterioplâncton foram utilizadas como mecanismos de avaliação do metabolismo da coluna d'água e do sedimento, atuando frente as diferentes variáveis analisadas.

A tese está estruturada na forma de capítulos, sendo que um deles já está publicado. A primeira parte da tese é composta por uma introdução geral. Nos capítulos 2 a 4 serão apresentados os manuscritos decorrentes dos experimentos, que serão submetidos à publicação.

Os capítulos 2 e 3 abordam aspectos do metabolismo da coluna d'água. Assim, o capítulo 2 refere-se à influência de diferentes níveis d'água (hidroperíodo) e diferentes tipos de macrófitas (emersas, submersas e flutuantes) na dinâmica do bacterioplâncton em lagos rasos subtropicais. O capítulo 3 refere-se aos efeitos decorrentes da quantidade de biomassa de uma macrófita submersa (*Potamogetum illinoensis*) na dinâmica do bacterioplâncton, observando esses efeitos sob diferentes níveis d'água. As abordagens do capítulo 4 e do capítulo 5 se referem a aspectos do metabolismo da interface água-sedimento e do sedimento. O capítulo 4 apresenta as alterações na estrutura e na comunidade do bacterioplâncton, sob diferentes espessuras do sedimento na interface água/sedimento de um ecossistema raso subtropical. O capítulo 5 apresenta o comportamento de gases de efeito estufa produzidos em duas áreas com diferentes conteúdos de carbono orgânico no sedimento, durante um ciclo produtivo de cultivo de arroz (*rice fields*) - artigo publicado (Canterle et al., 2010).

Uma discussão geral, as conclusões e as referências bibliográficas são apresentadas, respectivamente, nos capítulos 6, 7 e 8 da tese.

**SUMÁRIO**

	página
Apresentação .....	xii
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1</b> Regime hídrico no Sistema Hidrológico do Taim .....	<b>1</b>
<b>1.2</b> Macrófitas aquáticas e sua importância no metabolismo aquático .....	<b>2</b>
<b>1.3</b> Dinâmica da ação microbiana e utilização do carbono orgânico dissolvido .....	<b>4</b>
<b>1.4</b> Dinâmica da transformação/decomposição da matéria orgânica no sedimento e produção de gases de efeito estufa .....	<b>6</b>
<b>1.5</b> Perguntas .....	<b>8</b>
<b>1.6</b> Objetivos .....	<b>8</b>
<b>2. Área de estudo – Sistema Hidrológico do Taim</b> .....	<b>10</b>
<b>3. Can water level and aquatic macrophytes drive bacterioplankton in a subtropical shallow lake?</b> .....	<b>13</b>
<b>4. Effects of a submerged macrophyte biomass on bacterioplankton dynamics under the influence of different hydrological regimes</b> .....	<b>35</b>
<b>5. Bacterioplankton dynamics and the structure of the community at the water/ sediment interface of the littoral zone in subtropical shallow ecosystems</b> .....	<b>66</b>
<b>6. Produção de gases de efeito estufa (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>) em banhados temporários subtropicais ...</b>	<b>104</b>
<b>7. Discussão geral</b> .....	<b>115</b>
<b>8. Conclusões</b> .....	<b>121</b>
<b>9. Referências bibliográficas</b> .....	<b>122</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Regime hídrico no Sistema Hidrológico do Taim**

O hidroperíodo é definido como a ocorrência periódica ou regular de inundação ou condições de solo saturado (frequência, duração), sendo, portanto, a assinatura hidrológica de um banhado, a qual depende do balanço hídrico, da topografia e das condições subsuperficiais. Ele determina a importância atribuída a esses ecossistemas e relaciona-se com as funções existentes ou os atributos de um banhado (Motta Marques et al., 2002) como, por exemplo, os processos físicos, químicos e biológicos, que são inter-relacionados (Motta Marques & Villanueva, 2001). A presença da vegetação é um dos principais fatores responsáveis pelas funções e valores das terras úmidas, principalmente por constituir uma grande resistência adicional ao escoamento da água (Paz, 2003).

O Sistema Hidrológico do Taim apresenta uma grande variação sazonal no nível da água e na extensão coberta pelo banhado. O hidroperíodo natural do Taim é o resultado da combinação da alternância sazonal normalmente entre invernos úmidos e verões secos, e entre anos úmidos e secos (Villanueva et al., 2000). Vários fatores contribuem para a definição dos níveis de água dentro do banhado do Taim, como a precipitação e evapotranspiração sobre a bacia contribuinte, a capacidade de escoamento dos canais, a capacidade de armazenamento das lagoas e das áreas limítrofes, os níveis da Lagoa Mirim, as características do escoamento dos conjuntos de condutos e a retirada de água para irrigação (Villanueva et al., 1997).

Entre os principais agentes intervenientes na hidrodinâmica do Taim estão fatores como a presença de vegetação, a ação do vento e a influência da lagoa Mangueira que, relacionados, tornam ainda mais complexo o estudo do comportamento hidrodinâmico desse sistema. O vento é considerado o principal agente de circulação da água, cujo padrão está associado ao padrão de variação do nível d'água da mesma, condicionando a distribuição espacial da vegetação aquática (Paz, 2003). Portanto, a variação do regime hídrico do Banhado do Taim pode estar relacionada

com as espécies de macrófitas do banhado, determinando não só a sua presença/ausência como também sua distribuição. O aumento da lâmina d'água está associado à predominância de espécies de macrófitas aquáticas flutuantes, bem como a tendência para a redução de espécies de macrófitas quando ocorre um aumento da profundidade da lâmina d'água (Motta Marques et al., 1997).

## **1.2. Macrófitas aquáticas e sua importância no metabolismo aquático**

As macrófitas aquáticas são elementos muito importantes na estruturação de lagos rasos subtropicais (Meerhoff et al., 2003), especialmente as macrófitas emergentes (Rodrigues, 2009). Particularmente em lagos rasos e banhados, as macrófitas submersas desempenham um papel fundamental na regulação dos processos, nesses ecossistemas (Wetzel, 1993; Jeppesen et al., 1997).

As macrófitas influenciam o metabolismo dos ecossistemas aquáticos continentais sob diversos aspectos. Nutrientes liberados pelo material senescente dessas plantas e de sua microflora epifítica são depositados e reciclados na superfície do sedimento, possibilitando a sua difusão para a água intersticial, juntamente com material detritico particulado (Wetzel & Søndergaard, 1997). Macrófitas enraizadas absorvem nutrientes das partes profundas do sedimento e os disponibilizam para outras comunidades, através do efeito de bombeamento (Mann & Wetzell, 1996). Assim, essas plantas podem promover liberação de fósforo a partir do sedimento (Granéli & Solander, 1988; Barko & James, 1997), influenciando a ciclagem de nutrientes cuja disponibilidade varia em função da carga de macrófitas (Søndergaard & Moss, 1997) ou da sua produção, como é o caso do nitrogênio orgânico dissolvido, no interior dos estandes dessas plantas (Stepanauskas et al., 2000). Dessa forma, as macrófitas possibilitam a sua participação no metabolismo dos ecossistemas também a partir de processos como



transformação, decomposição e mineralização dos nutrientes no reservatório de detritos (Wetzel & Søndergaard, 1997).

A influência da composição específica da comunidade de macrófitas é muito importante, uma vez que existem diferenças metabólicas e estruturais entre diferentes espécies de plantas (Søndergaard & Moss, 1997). A porcentagem de cobertura de macrófitas (% PVI) poderia explicar em grande parte a variação nos níveis de fósforo, biomassa fitoplanctônica, respiração planctônica e produção bacteriana ao longo de um gradiente de cobertura dessas plantas (Rooney & Kalff, 2003a), resultando em alterações na qualidade da água dos sistemas. Possíveis efeitos negativos de macrófitas submersas se referem ao aumento do sombreamento ou a redução das condições de luz, enquanto os efeitos positivos são decorrentes da redução da ressuspensão de sedimento e conseqüente redução na turbidez d'água, bem como da alteração da carga interna de fósforo (Søndergaard & Moss, 1997; Horppila & Nurminen, 2003), além de outros efeitos indiretos. Todos esses mecanismos interagem e dependem da % PVI (Søndergaard & Moss, 1997).

Alterações na densidade e na cobertura das macrófitas associados à pressão de predação, poderiam levar a um impacto positivo de mudança na estrutura biológica e na qualidade da água em lagos rasos eutrofizados (Schriver et al., 1995) afetando fortemente a riqueza de espécies (Kruk et al., 2009). Se por um lado o tipo de macrófita como, por exemplo, as macrófitas submersas, podem afetar a biomassa do fitoplâncton e a estrutura da comunidade aumentando a predação, por outro lado as macrófitas podem afetar o zooplâncton reduzindo seu crescimento ou modificando suas estratégias de vida (Wetzel & Søndergaard, 1997; Burks et al., 2000). A redução no crescimento do zooplâncton pode ser decorrente de um efeito alelopático exercido pelas macrófitas que impacta, diretamente, também o fitoplâncton e as algas epifíticas, e indiretamente, o bacterioplâncton pela supressão, principalmente, do fitoplâncton (Körner & Nicklisch, 2002, Hilt et al. 2006, Cerbin et al., 2007, Gross et al., 2007, Hilt & Gross, 2008).

Além disso, a senescência das macrófitas, principalmente das submersas, é associada à liberação de material solúvel pelas plantas, seguida de um aumento de produção bacteriana (Wetzel & Søndergaard, 1997; Rooney & Kalff, 2003b), como consequência das mudanças promovidas na atividade desses microorganismos.

### **1.3. Dinâmica da ação microbiana e utilização do carbono orgânico dissolvido**

O bacterioplâncton realiza diferentes funções ecológicas nos ecossistemas aquáticos, convertendo constituintes inorgânicos, como dióxido de carbono ou bicarbonato, e nitrogênio e fósforo inorgânico, em componentes orgânicos celulares (Pomeroy et al., 2007). Os microorganismos pelágicos formam uma alça dentro da rede trófica pelágica, uma vez que utilizam a matéria orgânica dissolvida como fonte de energia e carbono, segundo Azam et al., (1983). Neste contexto, as bactérias são organismos chave no metabolismo dos ecossistemas aquáticos, em razão de sua capacidade de consumir carbono oriundo da produção primária e, desta forma, produzir biomassa que pode ser transferida através da rede trófica microbiana, além de atuar na mineralização do carbono orgânico dissolvido (COD) para CO<sub>2</sub>. Como a matéria orgânica é incorporada à biomassa bacteriana e posteriormente consumida por outros organismos, a transferência de matéria orgânica segue a cadeia alimentar clássica e, dessa forma, as bactérias podem ser consideradas a base de cadeias alimentares planctônicas em vários ecossistemas aquáticos, além de exercer também um importante papel no fluxo de CO<sub>2</sub> na biosfera (Cotner & Biddanda, 2002).

As bactérias heterotróficas capturam moléculas orgânicas dissolvidas da água, bem como partículas orgânicas que são digeridas com o uso de enzimas (Pomeroy et al., 2007). Os compostos de baixo peso molecular, produtos da ação enzimática, podem então ser usados por células microbianas para obtenção da energia necessária e produzir biomassa (Chróst, 1991). O papel ecológico do bacterioplâncton, reduzindo o excesso de carga orgânica e produzindo

biomassa que pode ser usada pelos consumidores, representa um exemplo de mecanismo de *feedback*, prevenindo colapsos no funcionamento desses sistemas lagunares (Danovaro & Pusceddu, 2007).

A radiação solar afeta e regula estes organismos, redirecionando fluxos de matéria orgânica de herbívoros para a rede trófica microbiana (Cotner & Biddanda, 2002). Ela pode agir de diferentes maneiras nos organismos heterótrofos. A radiação UV pode afetar a quantidade do carbono orgânico que passa através da alça microbiana, a partir da alteração fotoquímica direta de pequenos compostos liberados via degradação de substâncias húmicas e da sua biodisponibilidade para o bacterioplâncton (Wetzel & Søndergaard, 1997; Cotner & Biddanda, 2002), alterando a eficiência da transformação da matéria orgânica em biomassa bacteriana (Hörtnagl et al., 2011). Por outro lado, a radiação UV também inibe o crescimento bacteriano em decorrência de seu efeito deletério sobre a célula bacteriana (Cole, 1999; Maranger et al., 2002). A fototransformação da matéria orgânica dissolvida pode apresentar efeitos contrastantes no metabolismo bacteriano dependendo da origem da água, aumentando ou diminuindo a eficiência bacteriana em amostras oriundas de ambientes costeiros oligotróficos ou em águas lagunares, respectivamente (Abboudi et al., 2008). Além da radiação UV, outra porção do espectro solar, a radiação fotossinteticamente ativa (PAR), pode ser igualmente importante na regulação do fluxo de matéria orgânica na alça microbiana (Cotner & Biddanda, 2002) desempenhando um importante papel na formação de COD lábil (Lindell et al., 1996).

Os organismos procariotos aperfeiçoaram sua bioquímica para a utilização e consumo de uma larga variedade de nutrientes, criando caminhos únicos e uma regulação genética para encontrar uma variedade de condições de habitat dentro dos ecossistemas (Hunter-Cevera, 1998). Assim como na coluna d'água, a atividade bacteriana tem um importante papel no fluxo de nutrientes do sedimento através do consumo ou liberação do excesso de fósforo, principalmente na sua interface com a água (Barko & James, 1997; Clavero et al., 1999), afetando também a

diminuição das perdas ou a liberação de nitrogênio (Clavero et al., 1999). Dessa forma, o bacterioplâncton também participa dos ciclos biogeoquímicos. Eles são responsáveis pela produção de gases contribuintes do efeito estufa, pois atuam na ciclagem do nitrogênio, processo fundamental para o ecossistema como um todo (Hahn, 2006) e desempenham um importante papel no fluxo de CO<sub>2</sub> na biosfera (Cotner & Biddanda, 2002), e na produção e consumo de gases como CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (Wetzel, 2001).

A diversidade da malha alimentar e a produtividade interagem e influenciam a composição e função da comunidade bacteriana, sendo que a atividade bacteriana é aumentada em malhas alimentares mais diversas (Krumins et al., 2006). Comunidades microbianas podem responder a esse variado suprimento de substratos por meio de adaptação fisiológica e/ou por mudanças na composição da comunidade (Abboudi et al., 2008). A competição com autótrofos eucarióticos por nutrientes dissolvidos e a competição com fagotróficos heterotróficos e processos físicos por carbono orgânico, representam aspectos importantes na determinação do impacto e da abundância relativa de procariotes, regulando estes organismos em ecossistemas aquáticos (Weisse, 2005).

#### **1.4. Dinâmica da transformação/decomposição da matéria orgânica no sedimento e produção de gases de efeito estufa**

A interface água-sedimento desempenha um importante papel na estruturação e no funcionamento de numerosos meios aquáticos, já que a água sobrejacente está fortemente ligada ao sedimento superficial através de uma vasta gama de processos físicos, químicos e biológicos. Com isso, a coluna sedimentar de ambientes aquáticos, principalmente a sua fração orgânica, realiza intercâmbio de substâncias dissolvidas e particuladas com a coluna da água sobrejacente (Wetzel & Søndergaard, 1997). O sedimento e a sua interface com a água representam locais de intensa atividade metabólica, onde ocorre degradação microbiana da matéria orgânica detritica e

de reciclagem biogeoquímica dos nutrientes (Santschi et al., 1990; Wetzel, 1993), com taxas de mineralização aproximadamente constantes mesmo em locais com diferente suprimento de carbono orgânico (Maerki et al., 2009).

Em locais de ocorrência de macrófitas, a produtividade das mesmas associada à da comunidade perifítica leva a produção de material senescente que se deposita e acumula na superfície do sedimento. Esse material pode ser reciclado, levando à difusão de nutrientes, especialmente fósforo, dos locais de decomposição para a água intersticial do sedimento e de material detritico particulado de origem macrofítica (Wetzel & Søndergaard, 1997; Brenner et al., 2006). A dinâmica e a liberação do fósforo a partir da interface, principalmente nos lagos rasos, são controlados pela magnitude da ação de fatores como o vento, que leva à ressuspensão da camada superficial do sedimento (de Vicente et al., 2010). Além disso, os organismos presentes no sedimento e na sua interface com a água podem estimular a liberação de fósforo desses locais, e alterar as condições microambientais adjacentes (Jiang et al., 2008).

Assim, a produção orgânica autóctone na zona litoral, junto com matéria orgânica alóctone lixiviada, suporta uma grande população microbiana e uma alta taxa de decomposição, resultando no mais intensivo nível de mineralização de carbono dentro de lagos (den Heyer & Kalff, 1998), e destinando ao bacterioplâncton um papel chave nos ciclos biogeoquímicos. A decomposição da matéria orgânica dissolvida resulta em produtos finais gasosos, enquanto que a matéria orgânica particulada pode ser convertida enzimaticamente a compostos orgânicos solúveis antes da degradação bioquímica para produtos gasosos (Wetzel & Likens, 2000).

Portanto, o aumento no fluxo de energia e matéria é importante para o metabolismo do ecossistema e para o ciclo do carbono, pois acarreta um aumento nas taxas de remineralização com produção direta de  $\text{CO}_2$  e CO (Lindell et al., 1995). No entanto, o processo de emissão desses gases apresenta uma grande variação espacial e temporal, que está relacionada a outros fatores tais como temperatura e a composição nas espécies de plantas, afetando sua produção,

oxidação ou transporte (van der Nat & Middelburg, 2000). Além desses fatores, em ecossistemas sujeitos a flutuações de nível d'água, essas flutuações podem afetar grandemente as condições dos produtores e de decompositores e, desse modo, os processos biogeoquímicos das áreas inundáveis (Juutinen et al., 2001).

Assim, os processos biogeoquímicos que ocorrem no sedimento podem alterar a qualidade da água sobrejacente, principalmente quando fatores como a turbulência e a hidrodinâmica aumentam o intercâmbio químico entre esses dois compartimentos, em especial nos ambientes aquáticos de pouca profundidade, como os lagos rasos subtropicais.

## **1.5 PERGUNTAS**

### **1.5.1 PERGUNTA GERAL**

A estrutura das comunidades bacterianas (densidade, biomassa, morfologia), os processos mediados pelo bacterioplâncton (atividade) e a composição dos grupos específicos da comunidade podem ser influenciados por diferentes mecanismos, relacionados com a variação do regime hídrico do sistema e com a presença de macrófitas aquáticas?

### **1.5.2 PERGUNTAS ESPECÍFICAS**

- ✓ A dinâmica e a estrutura da comunidade bacteriana na coluna d'água são afetadas pela variação do regime hídrico e pela presença de macrófitas aquáticas?
- ✓ Os processos de transferência e aproveitamento de substratos e a interação entre a interface água/sedimento dirigem a dinâmica, a estrutura e os processos mediados pelo bacterioplâncton, nesses locais?

## **1.6 OBJETIVOS**

### **1.6.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar os processos metabólicos que ocorrem na coluna d'água, na interface água-sedimento e no sedimento de uma área úmida subtropical, associados à dinâmica do bacterioplâncton e relacionados à diferentes variáveis, como a oscilação do nível de água, a espessura da coluna de sedimento, a quantidade de biomassa vegetal, bem como o tipo de macrófita predominante.

### **1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Analisar a influência das alterações do regime hídrico e da presença de diferentes tipos de macrófitas na dinâmica (densidade, biomassa, atividade e morfotipagem) do bacterioplâncton.
- ✓ Avaliar o efeito da quantidade de biomassa de uma macrófita submersa na dinâmica do bacterioplâncton, sob diferentes regimes hídricos.
- ✓ Analisar o efeito da espessura de camadas de sedimento na estrutura e atividade do bacterioplâncton presente na coluna d'água adjacente.
- ✓ Identificar a composição de grupos específicos que formam a comunidade bacteriana na coluna d'água em contato com diferentes espessuras de camadas de sedimento.
- ✓ Identificar a ocorrência e dominância de morfotipos bacterianos em função de diferentes fatores limitantes.
- ✓ Analisar o metabolismo do sedimento de ecossistemas alagados temporários (rice fields), em áreas com diferentes tipos de sedimento, a partir da produção de gases contribuintes de efeito estufa ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ).
- ✓ Fornecer subsídios a respeito do metabolismo bacteriano e da produção de gases de efeito estufa, na coluna d'água e na interface água/sedimento, como ferramenta para a previsão de processos metabólicos geradores de alterações do estado do ecossistema.

## 1.7 ÁREA DE ESTUDO - SISTEMA HIDROLÓGICO DO TAIM

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul, que inclui o Sistema Hidrológico do Taim e a lagoa Mangueira (aproximadamente 820 km<sup>2</sup>) possui uma extensão aproximada de 640 km e abrange uma superfície de 22.740 km<sup>2</sup> de terras emersas e 14.260 km<sup>2</sup> de superfícies de lagoas e lagoas, num total de 37.000 km<sup>2</sup> (Schwarzbold & Schäfer, 1984). Todo o sistema tem uma área de 2.254 km<sup>2</sup>, incluindo a Estação Ecológica do Taim (ESEC-Taim).

Esse sistema é formado por subsistemas e faz parte de um gradiente de terras alagáveis, que se caracteriza pela presença de banhados e lagoas associadas, de água doce, situados nos municípios de Rio Grande (52°20' e 52°45') e Santa Vitória do Palmar (32°20' e 33°00' S), no sul do Rio Grande do Sul (Motta Marques et al., 2002).

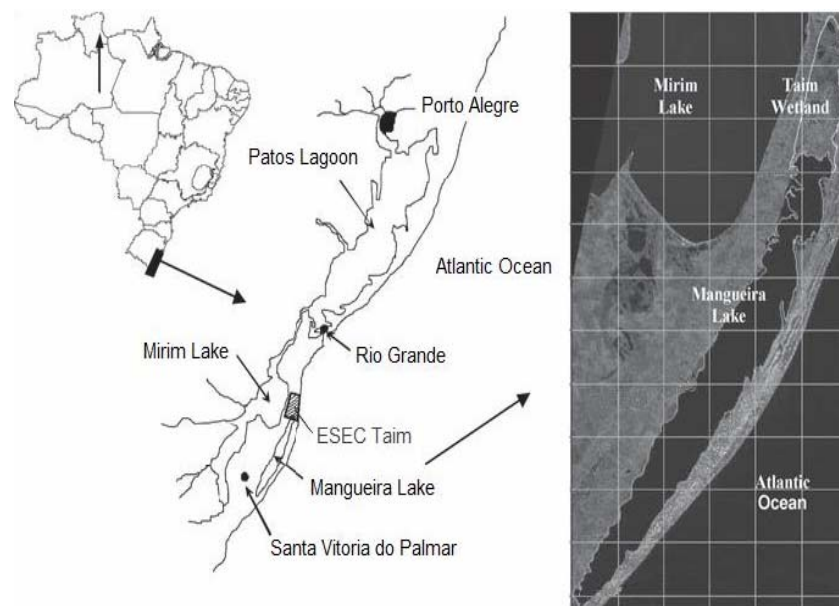


Figura 1. Localização do Sistema Hidrológico do Taim (modificado de Fragoso Jr. et al, 2008).

Segundo Villanueva et al. (2000), os subsistemas que formam o Sistema Hidrológico do Taim são: a) O Subsistema Norte, composto pela Lagoa Caiubá, Lagoa das Flores e o Banhado do Maçarico, este último com afluência para a Lagoa das Flores; b) O subsistema Banhado, que é o banhado do Taim propriamente dito, incluindo as lagoas Nicola e Jacaré, localizadas dentro



do banhado; c) O subsistema Mangueira, que é a área de contribuição da Lagoa Mangueira, representando a principal fonte de água para o banhado.

O escoamento do subsistema do banhado é o Banhado propriamente dito, conectado à Lagoa Mangueira e sua bacia de contribuição, através do canal junto a BR-471 e da interface lagoa-banhado. O banhado é caracterizado por baixas velocidades superficiais, devido à existência de macrófitas aquáticas e de biomassa, e a saída de água acontece pelas comportas no extremo norte, em direção à Lagoa Mirim (Motta Marques et al., 2002). O sistema apresenta uma grande variação sazonal no nível da água e na extensão coberta pelo banhado. O hidroperíodo natural do Taim é o resultado da combinação da alternância sazonal normalmente entre invernos úmidos e verões secos, e entre anos úmidos e secos (Villanueva et al., 2000).

A região onde está localizado o banhado do Taim sofre, durante todo o ano, a ação de ventos intensos (nordeste, sudoeste e sul), que interferem na evaporação, na remoção de sedimentos inconsolidados, no transporte vertical (advecção), no transporte de nutrientes na coluna d'água e na vegetação, entre outros (Azevedo, 1995).

Ações antrópicas externas aos banhados podem alterar as funções e os valores dos mesmos (Motta Marques et al., 2002). Em muitos banhados essas alterações ocorrem na ciclagem química, através do aporte de poluentes de diversas fontes (Mitsch & Gosselink, 1993). No Taim, entre as ações destaca-se o cultivo das lavouras de arroz, cuja irrigação demanda uma quantidade de água elevada ( $2 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ), fornecida pelas lagoas do sistema, durante aproximadamente 90 dias. O uso da água para irrigação promove uma redução sensível no nível das lagoas num período de baixa precipitação (verão) e interfere diretamente na conservação das condições ambientais (Motta Marques et al., 2002). Esta atividade agrícola utiliza herbicidas e fertilizantes a fim de maximizar a produção, e os nutrientes, ou nutrientes mais poluentes, podem entrar no sistema, enriquecer a reserva dos mesmos no ambiente e afetar a produtividade primária e os organismos da rede trófica. Além disso, as embalagens dos produtos, quando

enterradas, podem contaminar o lençol freático, agravando o quadro (Azevedo, 1995). Outra ação antrópica local é a pecuária, que utiliza os campos de plantio de arroz nos anos de pousio. Essa atividade necessita a dragagem permanente dos mesmos e impossibilita o retorno gradual das funções do banhado para essas áreas, além da liberação de poluentes gerados pela atividade, incluindo nutrientes (Motta Marques et al., 2002). Em função do bombeamento e rebaixamento do nível da água, elevadas concentrações de fosfato e nitrato são observadas (Hamester et.al., 2005) podendo levar à mudanças na estrutura do sistema.

Tais ações e conseqüentes alterações interferem diretamente na quantidade de água e na conservação do ecossistema, alterando significativamente a riqueza de espécies e os padrões de comunidades, de produtividade e habitat. Segundo Motta Marques et al., (2002), essas alterações podem ser observadas, por exemplo, pelo predomínio de espécies flutuantes de macrófitas aquáticas e pela redução do número de espécies, quando ocorre o aumento e manutenção da lâmina d'água do sistema por um longo período de tempo.