

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

INFLUÊNCIA DA HIDRODINÂMICA NO METABOLISMO DE LAGOS RASOS

JOSÉ RAFAEL DE ALBUQUERQUE CAVALCANTI

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

Orientador: Prof. David da Motta Marques

Banca examinadora:

Prof. Albano Schwarzbold	PPG-Ecologia/UFRGS
Prof. Carlos Ruberto Fragoso Jr	PPGRHS/UFAL
Prof. Juan Martin Bravo	IPH/UFRGS

Porto Alegre, fevereiro de 2013

*“Out of the night that covers me,
Black as the Pit from pole to pole,
I thank whatever gods may be
For my unconquerable soul.
In the fell clutch of circumstance
I have not winced nor cried aloud,
Under the bludgeonings of chance
My head is bloody, but unbowed.
Beyond this place of wrath and tears
Looms but the horror of the shade,
And yet the menace of the years
Finds, and shall find me, unafraid.
It matters not how strait the gate,
How charged with punishments the scroll,
I am the master of my fate:
I am the captain of my soul.”*

William Ernest Henley

“A man's dreams are an index to his greatness.”

Zadok Rabinowitz

AGRADECIMENTOS

Antes dos agradecimentos “normais”, queria agradecer a “Ele”. Mesmo não se fazendo visível sempre é possível identificar suas ações na minha vida...

Os primeiros agradecimentos vão para meus orientadores. Ao longo do trabalho nos deparamos com situações que todos preferiam não termos nos deparado (no final eu gostei do que aprendi, mesmo que tenha ganho alguns cabelos brancos a mais). O prof. Ruberto me ensinou a olhar sempre o lado bom das coisas, cada dificuldade foi uma oportunidade em potencial de aprendizado ou de publicação. Espero conseguir aproveitar e aprender ainda mais com essa forma positiva de olhar as coisas. O prof. David é uma pessoa peculiar. Demora até nos acostumarmos com seu jeito, mas uma vez que aprendemos como ele funciona, o trabalho flui. Está sempre disposto a ajudar e quando você pensa que ele te esqueceu ele aparece, te cobrando tudo aquilo que você torcia pra ele esquecer!!! Nunca vou esquecer do aprendizado que tive com ele e que vou continuar a ter: Sempre olhar o **macro**.

“(R) - Mas professor, meu objetivo é investigar porque o céu é azul. Porque me preocupar com a formiga que está consumindo nutrientes numa rocha enterrada no meio do lago??

(D) - Tudo está relacionado cabeça!! Não vais avaliar este processo, mas tu precisas me mostrar que ele esta correto!!!”

Demorou mas acredito que comecei a entender como a modelagem ecológica funciona realmente!!!! Hehehehe

Além dos orientadores que me ajudaram muito no desenvolvimento deste trabalho, meus colegas de “cafofo” foram muito importantes. R. Souza, Mino e Carlos. Acredito que sem as conversas e brincadeiras esses dois anos não teriam sido tão legais. Foi muito bom saber que podia conversar e confiar em vocês. As colegas do “moquifo” também tiveram muita importância. A minha professora Lúcia Rodrigues, Marla, Tabatha, dani, fabi e todas as outras, obrigado por sempre estarem dispostas a ouvir as minhas brincadeiras!!

Não tem como não agradecer aos outros amigos que fiz no IPH. Angélica, Leandro, David, Victor, Ju, Alex, Felipe, Thomaz, Sacire, Renata, Adrien, Rodrigo, Adalberto, Bike, Junior, Crica, Dani, Marco, Leo (os dois),

Juan e tantos outros que vão desde técnicos a professores. Agradeço pelos momentos bons que tivemos, seja nas aulas, nos laboratórios, nos churrascos, nas peladas ou em simples conversas pelo corredor.

Agora vem a hora dos agradecimentos especiais! Estes eu não poderia agregar juntos aos outros (sem ofensas a ninguém!). Primeiro a minha “família” aqui em Porto Alegre. Rosane, Paulo, Anelise, Eugênio, Marcos, Mino e Júnior. Vocês me ajudaram muito e nunca vou esquecer nossos laços. Nunca é fácil sair de perto de quem ta sempre torcendo por você e te apoiando, mas aqui eu sinto que esse sentimento continua. Obrigado pelo apoio e espero que nossos laços se fortaleçam sempre mais!!!

Segundo agradecimento especial é para minha família (a verdadeira) em Maceió, sem eles nada disso teria sido possível. É a chama do esforço de vocês que está acesa dentro de mim. Vocês me ensinaram mais do que qualquer um poderia me ensinar e me mostraram mais de uma vez qual caminho seguir quando me perco. Espero continuar sendo um dos motivos de orgulho de vocês, mesmo quando esse orgulho não for merecido. Saibam que amo todos e que a saudade não é nada pra quem eu tenho no coração. Pai, mãe e irmãs (a preta e a branca), agradeço todos os dias por ter escolhido vocês!!

O último agradecimento em especial vai para a minha companheira, Raíza, sem a qual eu não conseguiria enxergar que sempre há mais do que posso ver. Aos poucos vamos vencendo a guerra “*distância x relacionamento*”. Vai chegar o momento em que estaremos juntos (como um) novamente, seja nesse plano ou no outro. Até lá, eu preciso dizer que te amo pra você lembrar?

RESUMO

Este trabalho parte da hipótese que a hidrodinâmica influencia o metabolismo de um lago. Para testar esta hipótese, este estudo utilizou uma estratégia numérica baseada em processos para avaliar o efeito da hidrodinâmica (governada pelo vento) sobre as estimativas de metabolismo (GPP, NEP e R) considerando a heterogeneidade espacial da lagoa Mangueira, um grande lago raso subtropical na costa sul do Brasil. O efeito da hidrodinâmica dominada pelo vento no metabolismo foi avaliado pela mudança da série de vento original (direção e intensidade), totalizando cinco novos cenários de vento. A avaliação espacial foi desenvolvida em quatro áreas (Norte, Centro, Sul e a lagoa como um todo) e em zonas biológicas (zona limnética e zona litorânea). Os resultados indicaram que há diferenças nas estimativas de metabolismo (GPP, NEP e R) entre as regiões da lagoa Mangueira considerando a situação com a série de vento original. Em geral, a diferença média nas estimativas de metabolismo entre a região Norte e a região Sul foi de 3,81 mgO₂/m³/dia (*p-value*<0,05) para o GPP, 3,32 mgO₂/m³/dia para R (*p-value*<0,05) e 0,49 mgO₂/m³/dia (*p-value*<0,05) para NEP. A diferença entre a zona litorânea e a zona limnética na lagoa Mangueira como um todo foi de 10,1 mgO₂/m³/dia para GPP, para R foi de 1,3 mgO₂/m³/dia e para NEP foi de 8,8 mgO₂/m³/dia. O metabolismo geral da lagoa também apresentou variações sazonais, alternando entre períodos autotróficos (NEP>0, em 41,0 % do tempo) e períodos heterotróficos (NEP<0, em 59,0 % do tempo). As estimativas de metabolismo da Lagoa Mangueira e nas regiões delimitadas se mostraram sensíveis a alterações no vento. Cada área delimitada apresentou resposta diferente às alterações nas séries de vento. Os cenários de vento testados mostram que a hidrodinâmica causa diferenças significativas no metabolismo da Lagoa Mangueira. O balanço de oxigênio neste ecossistema foi influenciado pela taxa de reaeração, pela produção primária e pela respiração do fitoplâncton. Os outros processos considerados no balanço de oxigênio não demonstraram contribuições importantes para o metabolismo geral do ecossistema.

Palavras-chave: Modelagem ecológica, GPP, R, NEP.

ABSTRACT

The hypothesis of this work is that hydrodynamics can alter the lake metabolism. To evaluate this hypothesis this study used a process-based strategy for evaluating the effect of wind-driven hydrodynamics on estimates of lake metabolism (GPP, R, and NEP) considering the spatial heterogeneity in Lake Mangueira, a subtropical grate lake in southern coast of Brazil. The effect of wind-driven hydrodynamics over the lake metabolism was evaluated by changes in the original wind series (direction and intensity), totalizing five new sets of wind scenarios. The spatial evaluation was carried in four different areas (North, Center, South, and the lake as a whole) and in two different biological zones (littoral zone and limnetic zone). Our findings indicate that there are differences on estimates of lake metabolism between the four areas taking into account the original wind time series. In general, the differences on lake metabolism estimates between the Norte region and the South region was 3.81 mgO₂/m³/day (*p-value*<0,05) for GPP, 3.32 mgO₂/m³/day (*p-value*<0,05) for R, and 0.49 mgO₂/m³/day (*p-value*<0,05) for NEP. The difference between the littoral zone and the limnetic zone in the Lake Mangueira as a whole was 10.1 mgO₂/m³/day for GPP, 1.3 mgO₂/m³/day for R, and 8.8 mgO₂/m³/day for NEP. The overall lake metabolism also presented seasonal variations, alternating among autotrophic periods (NEP>0, 41.0% of the time), and heterotrophic periods (NEP<0, 59.0% of the time). Estimates of lake metabolism in Lake Mangueira as a whole were sensitive to changes in the wind time series. Each area showed different response to the changes in wind time series. The tested sets of wind scenarios showed that wind-driven hydrodynamics can significantly alter the Lake Mangueira metabolism estimates. The overall oxygen balance in this system was mostly influenced by reaeration, and by the primary production and respiration of phytoplankton. The other processes considered in the oxygen balance showed no significant contributions to the overall metabolism of the ecosystem.

Keyword: Ecological Modelling, GPP, R, NEP.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	v
ABSTRACT.....	vi
SUMÁRIO	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Metabolismo Aquático	14
1.2 Metabolismo de lagos: Modelagem baseada em processos.....	18
2 HIPÓTESE	22
2.1 Hipótese	22
3 OBJETIVOS	22
3.1 Objetivo geral	22
3.2 Objetivos específicos.....	22
4 METODOLOGIA	23
4.1 Área de estudo	23
4.2 Modelo IPH-ECO.....	24
4.2.1 <i>Dados de entrada do modelo – Variáveis meteorológicas</i>	26
4.2.2 <i>Dados de entrada do modelo – Condições de contorno</i>	28
4.3 Estimativa do metabolismo baseada em processos.....	30
4.4 Zoneamento da Lagoa Mangueira	30
4.5 Cenários de simulação.....	31
4.6 Análise dos resultados	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 Balanço de oxigênio e processos componentes do metabolismo ..	34
5.2 Metabolismo: Variação sazonal e espacial.....	37
5.3 Metabolismo: Comparação entre cenários de vento	47

5.3.1	<i>Região Norte</i>	47
5.3.2	<i>Região Central</i>	51
5.3.3	<i>Região Sul</i>	56
5.3.4	<i>Lagoa Mangueira</i>	60
6	CONCLUSÕES	66
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
8	ANEXO.....	77
8.1	Estimativas de metabolismo: regiões geográficas.....	77
8.1.1	<i>Região Norte</i>	77
8.1.2	<i>Região Central</i>	79
8.1.3	<i>Região Sul</i>	81
8.2	Estimativas de metabolismo: cenários de vento simulados.....	84
8.2.1	<i>Cenário sem vento</i>	84
8.2.2	<i>Cenário de vento com direções opostas</i>	86
8.2.3	<i>Cenário com vento constante</i>	88
8.2.4	<i>Cenário de vento com velocidade dobrada</i>	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Localização da lagoa Mangueira.	24
Figura 4.2 - Ventos dominantes para a lagoa Mangueira entre 2001 a 2006.	27
Figura 4.3 - Distribuição das ocorrências do vento com relação a sua magnitude.	28
Figura 4.4 - Lagoa Mangueira. São mostradas sub-bacias, pontos onde ocorrem bombeamento de água para irrigação e as estações de monitoramento onde foram coletadas as séries meteorológicas e os dados de qualidade da água (TAMAS, TAMAC, TAMAN). Uma linha pontilhada (...) demarca a separação estimada entre a zona limnética e a zona litorânea. A linha tracejada (---) demonstra a separação entre a zona Norte (N), a zona Central (C) e a zona Sul (S).	29
Figura 4.5 - Separação da lagoa em zonas biológicas (adaptado de Ji, 2008).	31
Figura 5.1 - Comparação entre os fluxos componentes do balanço de oxigênio para a Lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.	34
Figura 5.2 - Comparação entre a concentração de oxigênio e o fluxo de reaeração na lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.	35
Figura 5.3 - Comparação entre NEP e a concentração de oxigênio para a Lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.	35
Figura 5.4 - Processos componentes da respiração do ecossistema para a Lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.	36
Figura 5.5 - Estimativa de metabolismo para a Lagoa Mangueira como um todo no cenário com vento observado. Uma linha contínua marca o eixo onde $GPP=R$	37
Figura 5.6 – Box-plot do GPP entre as zonas biológicas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.	38
Figura 5.7 - Box-plot do NEP entre as zonas biológicas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.	39
Figura 5.8 - Box-plot de R entre as zonas biológicas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.	39
Figura 5.9 - Box-plot de GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.	41
Figura 5.10 - Box-plot de R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.	41
Figura 5.11 - Box-plot de NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.	42
Figura 5.12 - Box-plot da biomassa de fitoplâncton entre as zonas biológicas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.	45
Figura 5.13 - Box-plot da biomassa de fitoplâncton entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.	46

Figura 5.14 - Box-plot para GPP entre os cenários de vento na região Norte.	47
Figura 5.15 - Box-plot para R entre os cenários de vento na região Norte.	48
Figura 5.16 - Box-plot para NEP entre os cenários de vento na região Norte.	49
Figura 5.17 - Box-plot para GPP entre os cenários de vento na região Central.	51
Figura 5.18 - Box-plot para R entre os cenários de vento na região Central.	52
Figura 5.19 - Box-plot para NEP entre os cenários de vento na região Central.	54
Figura 5.20 - Box-plot para GPP entre os cenários de vento na região Sul.	56
Figura 5.21 - Box-plot para R entre os cenários de vento na região Sul.	57
Figura 5.22 - Box-plot para NEP entre os cenários de vento na região Sul.	58
Figura 5.23 - Box-plot para GPP entre os cenários de vento na Lagoa Mangueira como um todo.	60
Figura 5.24 - Box-plot para R entre os cenários de vento na Lagoa Mangueira como um todo.	61
Figura 5.25 - Box-plot para NEP entre os cenários de vento na Lagoa Mangueira como um todo.	62
Figura 5.26 - Padrões de circulação na lagoa Mangueira e regiões. Cenário com vento observado, dia 05/01/2001 às 12:00 hrs.	65
Figura 8.1- Estimativa de metabolismo para a região Norte da Lagoa Mangueira no cenário com vento observado. Uma linha contínua marca o eixo onde $GPP=R$	77
Figura 8.2 – Box-plot para o GPP entre zonas biológicas delimitadas para a região Norte. Cenário com vento observado.	78
Figura 8.3 – Box-plot para o NEP entre zonas biológicas delimitadas para a região Norte. Cenário com vento observado.	78
Figura 8.4 – Box-plot para R entre zonas biológicas delimitadas para a região Norte. Cenário com vento observado.	79
Figura 8.5 - Estimativa de metabolismo para a região Central da lagoa Mangueira no cenário com vento observado. Uma linha contínua marca o eixo onde $GPP=R$	80
Figura 8.6 – Box-plot para GPP entre as zonas biológicas delimitadas para a região Central. Cenário com vento observado.	80
Figura 8.7 – Box-plot para NEP entre as zonas biológicas delimitadas para a região Central. Cenário com vento observado.	81
Figura 8.8 – Box-plot para R entre zonas biológicas delimitadas para a região Central. Cenário com vento observado.	81
Figura 8.9 - Estimativa de metabolismo para a região Sul da Lagoa Mangueira no cenário com vento observado. Uma linha contínua marca o eixo onde $GPP=R$	82
Figura 8.10 – Box-plot para GPP entre zonas biológicas delimitadas para a região Sul. Cenário com vento observado.	82
Figura 8.11 – Box-plot para NEP entre zonas biológicas delimitadas para a região Sul. Cenário com vento observado.	83

Figura 8.12 – Box-plot para R entre zonas biológicas delimitadas para a região Sul. Cenário com vento observado.	83
Figura 8.13 - Box-plot do GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário sem vento.	84
Figura 8.14 - Box-plot do NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário sem vento.	85
Figura 8.15 - Box-plot de R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário sem vento.	85
Figura 8.16 - Box-plot do GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com direções opostas.	86
Figura 8.17 - Box-plot do NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com direções opostas.	87
Figura 8.18 - Box-plot do R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com direções opostas.	87
Figura 8.19 - Box-plot do GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento constante.	89
Figura 8.20 - Box-plot do NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento constante.	89
Figura 8.21 - Box-plot do R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento constante.	90
Figura 8.22 - Box-plot do GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com velocidade dobrada.	91
Figura 8.23 - Box-plot do NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com velocidade dobrada.	91
Figura 8.24 - Box-plot do R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com velocidade dobrada.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Métodos mais utilizados para estimar metabolismo em ambientes aquáticos (adaptado de Staehr <i>et al.</i> , 2012).....	15
Tabela 4.1 - Separação dos processos componentes do metabolismo aquático.	30
Tabela 5.1 – Período de tempo em condição autotrófica e condição heterotrófica por região geográfica na Lagoa Mangueira.....	40
Tabela 5.2- Valores de metabolismo estimados em outros trabalhos.	43
Tabela 5.3 - Velocidades médias da água por região e para Lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.	46
Tabela 5.4 - Velocidades média da água e sentidos predominantes para cada cenário na região Norte.....	51
Tabela 5.5 - Velocidades médias da água e sentidos predominantes para cada cenário na região Central.	56
Tabela 5.6 - Velocidades médias da água e sentidos predominantes para cada cenário na região Sul.	60
Tabela 5.7 - Velocidades médias da água e sentidos predominantes para cada cenário na Lagoa Mangueira como um todo.	64
Tabela 8.1 - Velocidades médias da água por região e para lagoa Mangueira no cenário sem vento.....	86
Tabela 8.2 - Velocidades médias por região e para lagoa Mangueira no cenário com direções trocadas.....	88
Tabela 8.3 - Velocidades médias por região e para lagoa Mangueira no cenário com vento constante.....	90
Tabela 8.4 - Velocidades médias por região e para lagoa Mangueira no cenário com velocidade dobrada.	92

LISTA DE SÍMBOLOS

- GPP - Produção primária bruta (do inglês, *Gross Primary Production*)
- NEP - Produção líquida do ecossistema (do inglês, *Net Ecosystem Production*)
- R - Respiração do ecossistema
- O₂ - Oxigênio
- CO₂ - Dióxido de carbono
- C - Carbono
- OD - Oxigênio dissolvido
- F - Fluxo de re-aeração com a atmosfera
- A - Termo que engloba “outras” variações no balanço de oxigênio
- SHT - Sistema Hidrológico do TAIM
- PO₄ - Ortofosfato

1 INTRODUÇÃO

1.1 Metabolismo Aquático

As taxas de metabolismo do ecossistema são parâmetros importantes que integram a atividade biológica e respondem a mudanças nos agentes controladores do sistema (Coloso *et al.*, 2011).

Existe uma relação entre a concentração de oxigênio dissolvido na água, a produção primária do sistema (GPP, *Gross Primary Production*) e a Respiração do ecossistema (R) (Odum, 1956). GPP é definido como o processo de conversão de carbono inorgânico em material carbonáceo (biomassa) e a liberação de oxigênio por meio da fotossíntese de seres autotróficos. R é a liberação de dióxido de carbono (CO₂) e o consumo de oxigênio (O₂) causado pela degradação aeróbia de material orgânico por todos os organismos (heterótrofos e autótrofos), e a oxidação de componentes reduzidos por meio da Respiração anaeróbia (Staeher e Sand-Jensen, 2007). O balanço entre GPP e R determinado pela razão entre produção primária e Respiração (GPP:R) ou pela produção líquida do ecossistema (NEP, *Net Ecosystem Production*) (NEP = GPP – R) pode ser utilizado como indicador do estado trófico de um ecossistema (Odum, 1956). Ecossistemas heterotróficos (NEP negativo) são aqueles onde ocorre maior consumo de oxigênio do que produção. Do contrário (NEP positivo), o ecossistema é considerado autotrófico.

Diversas metodologias podem ser aplicadas para avaliar GPP, R e NEP. Porém, apesar de diversas novas técnicas terem sido desenvolvidas e aplicadas na última década (Tabela 1.1) não existe uma tendência de utilização de apenas uma técnica (Kemp e Testa, 2011; Staeher *et al.*, 2012). As técnicas existentes podem ser utilizadas em estuários, rios, lagos e oceanos. Devido às características (físicas, químicas e biológicas) particulares de cada ambiente, algumas técnicas tendem a ser mais eficientes que outras.

Tabela 1.1 - Métodos mais utilizados para estimar metabolismo em ambientes aquáticos (adaptado de Staehr *et al.*, 2012).

Método	Ecossistema	Escala temporal	Vantagens	Desvantagens
Ciclo diário de O ₂	Estuário, lagos, rios e oceanos	Diária, sazonal, anual	Mede todos os componentes do sistema; Coleta de dados por acesso remoto; Computação direta; Medições precisas; Taxas em alta frequência; Sensores multi-variáveis.	Fluxo ar-água difícil de quantificar; Problemas para converter O ₂ em C; Processos físicos podem ocultar processos biológicos; Não computa Respiração anaeróbia; Problemas com estratificação; Não diferencia taxas de cada componente.
Isótopos de Oxigênio	Estuário, lagos, rios e oceanos	Diário, sazonal	Mede todos os componentes do sistema; As taxas podem ser a longo ou curto prazo; Método sensível.	Necessário conhecer o fluxo ar-água; Problemas para converter O ₂ em C; Amostragem intensiva; Traça produção e Respiração diurnos.
Balanços do Ecossistemas	Estuário, lagos, rios e oceanos	Sazonal, anual	Mede todos os componentes do sistema; Computação direta; Dados amplamente disponíveis; Estimativas de erros formais.	Fluxo ar-água difícil de quantificar; Problemas para converter O ₂ em C ou DIP; Efeitos abióticos em PO ₄ ³⁻ ; Alto erro acumulado; Calcula apenas o NEP.
Incubações	Estuários, lagos, rios e oceanos	Horário, diário	Medições de processos diretamente; Altamente controlado; Medições precisas; Permite separar componentes do ecossistema.	Problemas para converter O ₂ em C; Necessita artefatos para confinamento; Trabalho intensivo em laboratório; Difícil de inferir para todo o ecossistema;

Os métodos utilizados para estimar GPP e R podem levar a diferentes conclusões sobre o estado trófico em lagos (Hanson *et al.*, 2003). Nestes ambientes, duas metodologias são mais utilizadas: a metodologia baseada em incubações (Gaarder e Gran, 1927) e a metodologia “*free-water*” (baseada no ciclo diário de O₂) (Odum, 1956).

O método da incubação consiste na medição da concentração de oxigênio dissolvido (OD) durante a incubação de amostras de água em garrafas expostas a luz e na escuridão para estimar taxas de produção primária e respiração, respectivamente (Staeher *et al.*, 2012). Incubações similares em câmaras de sedimento são utilizadas para medir fotossíntese e respiração para organismos bentônicos, e quando estas medições são combinadas com aquelas realizadas para água, geram estimativas do metabolismo do ecossistema de forma integrada (e.g. Barko *et al.*, 1977; Kemp *et al.*, 1997; Gazeau *et al.*, 2005; Staeher *et al.*, 2012). Apesar de bastante utilizada ao longo dos anos (Staeher *et al.*, 2012), essa metodologia apresenta limitações. Dentre as principais limitações, destacam-se (Van de Bogert *et al.*, 2007): (a) o efeito do recipiente utilizado para coleta das amostras de água ou de sedimento (Petersen *et al.*, 1997; 1999) e (b) as incertezas para extrapolar valores para o lago como um todo (problemas de escala) (Gerhart e Likens 1975; Chen *et al.*, 2000), em função principalmente da grande heterogeneidade do bentos (ex. substrato, densidade de macrófitas, radiação solar incidente).

A metodologia baseada no ciclo diário de O₂ supõe que alterações na concentração de OD na água refletem o balanço biológico entre fotossíntese e respiração do ecossistema e a troca de oxigênio na interface ar-água (Staeher e Sand-Jensen, 2007). Esta metodologia ganhou força com o advento de instrumentos acessíveis que medem de forma contínua e confiável gases dissolvidos (Sondas de O₂ e CO₂), permitindo montar grandes séries de dados em alta frequência (*i.e.* com intervalos de tempo pequeno) para estimar o metabolismo do sistema (Langdon 1984; Uehlinger e Naegeli, 1998; Mulholland *et al.*, 2001; Hanson *et al.*, 2003; Van de Bogert *et al.*, 2007). Esta técnica vem sendo utilizada em diversos estudos (e.g. Cole *et al.*, 2000; Hanson *et al.*, 2003; Lauster *et al.*, 2006; Staeher e Sand-Jensen, 2007; Van de Bogert *et al.*, 2007; Sadro *et al.*, 2011), porém, esse método também apresenta algumas limitações como , por exemplo, a falta de sensibilidade das sondas quando

utilizadas em ambientes pouco produtivos (Carignan, 1998), além disso as alterações na concentração de OD não remetem apenas a atividade metabólica e fluxos com a atmosfera, mas também a carga de água subterrânea, interações físico-químicas e foto-Respiração do carbono orgânico dissolvido (Hanson *et al.*, 2003).

Não há razões para esperar que estimativas por sonda e por incubações do metabolismo de lagos sejam iguais, porque essas técnicas medem diferentes componentes do metabolismo (Hanson *et al.*, 2003). Incubações medem o metabolismo planctônico na zona limnética, e as sondas medem as variações na concentração de gases, podendo incluir contribuições limnéticas, dos sedimentos, de águas subterrâneas e superficiais e de misturas com camadas mais profundas (Hanson *et al.*, 2003; Lauster *et al.*, 2006). Entretanto, até o momento ainda não é claro se as sondas são capazes de medir o metabolismo de lagos como um todo ou apenas uma parte dele, uma vez que essa metodologia consiste na utilização de um único sensor colocado no meio da zona limnética (Lauster *et al.*, 2006; Van de Bogert *et al.*, 2007).

A zona litorânea e a zona limnética podem gerar contribuições significantes para o metabolismo do lago como um todo (Vadeboncoeur *et al.*, 2002; 2008). Entretanto, em geral esta afirmação pode não ser correta. Existem estudos que indicam que diferentes estimativas de metabolismo podem ocorrer entre a zona limnética e a zona litorânea (Lauster *et al.*, 2006; Van de Bogert *et al.*, 2007) e outros que indicam o contrário (Coloso *et al.*, 2008), sendo difícil generalizar a afirmação de que as zonas biológicas sempre geram estimativas de metabolismo diferentes. O grau de isolamento entre essas zonas biológicas (limnética e litorânea) pode depender do tamanho do lago e de sua morfologia, área total da região litorânea, magnitude e direção dos ventos prevalecentes, e aspectos do balanço de calor do lago como a estabilidade térmica e a heterogeneidade espacial existente (Sadro *et al.*, 2011).

O metabolismo em lagos é influenciado por diferentes agentes em diferentes escalas de tempo (Hanson *et al.*, 2006; Staehr e Sand-Jensen, 2007) e espaço (Lauster *et al.*, 2006; Van de Bogert *et al.*, 2007). Diferenças diárias nas taxas metabólicas em lagos podem ser influenciadas, principalmente, por alterações na luz disponível, temperatura da água e grau de mistura da coluna d'água devido à hidrodinâmica (Hanson *et al.*, 2006; Staehr e Sand-Jensen,

2007), por outro lado, diferenças a longo prazo estão relacionadas ao total de fósforo disponível, clorofila-a, e carbono orgânico dissolvido na água (Sand-Jensen e Staehr, 2007; 2009). A heterogeneidade espacial de taxas metabólicas pode variar com a morfologia e complexidade espacial do lago (Staehr *et al.*, 2010; 2012b) e também com misturas na coluna d'água da hidrodinâmica (Van de Bogert *et al.*, 2007; Coloso *et al.*, 2011b).

1.2 Metabolismo de lagos: Modelagem baseada em processos

Modelos são representações simplificadas de fenômenos complexos. Apesar de não conter todas as características do sistema real, um modelo compreende as características mais importantes, essenciais para a descrição do fenômeno de interesse (Soetaert e Herman, 2009). Talvez a principal contribuição fornecida por um modelo seja o estabelecimento de prioridades de pesquisa, as quais podem revelar propriedades do sistema a partir de hipóteses científicas geradas pelo próprio modelo (Fragoso Jr. *et al.*, 2009).

Modelos matemáticos são capazes de descrever as principais características do ecossistema em termos matemáticos (Jorgensen e Fath, 2011). O uso destes modelos vem aumentando ao longo dos últimos anos, permitindo sua utilização em qualquer tipo de ecossistema e para quase todos os problemas ambientais conhecidos atualmente (Jorgensen, 2009). Modelos matemáticos representam uma boa alternativa para avaliações integradas de ecossistemas aquáticos, uma vez que eles possuem uma abordagem mais interdisciplinar e sistemática, podendo fornecer uma aproximação dos danos causados por uma determinada atividade no meio ambiente (Fragoso Jr. *et al.*, 2009).

Dentre os modelos matemáticos utilizados para estimar o metabolismo em lagos, destaca-se a equação de Odum (1956), tipicamente escrita como:

$$\frac{\Delta O_2}{\Delta t} = GPP - R - F - A \quad (1)$$

onde $\Delta O_2/\Delta t$ é a variação na concentração de oxigênio dissolvido com o tempo, GPP é a produção primária bruta, R é a respiração do ecossistema, F é a troca de oxigênio com a atmosfera e A é um termo que contempla todos os outros processos que possam causar alterações na concentração de oxigênio dissolvido. Estes processos podem incluir advecção (horizontal ou vertical)

dentro do lago, oxidação foto-química da matéria orgânica, e respiração anaeróbia de oxigênio (Staehr *et al.*, 2010b). Uma alternativa à utilização da equação de Odum (1956) é o uso de equações que representam GPP e R de forma direta (e.g. Holtgrieve *et al.*, 2010). Entretanto, o desempenho da equação de Odum (1956) se mostrou similar ao desempenho destas equações mais complexas (Hanson *et al.*, 2008), indicando que o método de Odum gera boas estimativa de metabolismo aquático.

As observações de oxigênio dissolvido são altamente não-lineares, indicando que sua dinâmica é controlada por uma coleção de fatores que sofrem alterações ao longo do ciclo diário. Variações na concentração de oxigênio dissolvido podem ser resultado de alterações da carga subterrânea e superficial, interações físico-químicas e fluxo com a atmosfera (Hanson *et al.*, 2003). Fatores físicos também desempenham um papel chave, especialmente quando importantes agentes controladores externos, como, por exemplo, vento e precipitação, variam rapidamente (Hanson *et al.*, 2008). Desta forma, uma alternativa para a representação mais completa do metabolismo de lagos (e seus processos) seria a utilização de modelos ecológicos que integrem a dinâmica de nutrientes, os processos biológicos e os processos físicos em sua idealização (Coloso *et al.*, 2011b; Staehr *et al.*, 2012; Antenucci *et al.*, 2012).

O uso de modelos baseados em processos como ferramenta para pesquisa científica vem se tornando muito relevante em estudos de ecossistemas (Brugnach, 2005). Esta abordagem vem sendo utilizada em diversas áreas de pesquisa, como mudanças no uso do solo (Shen *et al.*, 2008; Siehoff *et al.*, 2011), análise de fluxo de carbono (Sitch *et al.*, 2007), produção primária líquida (Huston e Wolverton, 2009) e metabolismo em ecossistemas terrestres (Xing *et al.*, 2008), balanço hidrológico (Pierson *et al.*, 2001) e estudos sobre biodiversidade (Nightingale *et al.*, 2008; Morin e Thuiller, 2009; Naiman *et al.*, 2010). Alguns trabalhos (e.g. Whigham e Recknagel (2001); Marcinkevage e Herricks (2005); Hayes *et al.*, 2007; Antenucci *et al.*, 2012) mostram a possibilidade de utilização desta abordagem em ambientes aquáticos. Dentre eles, apenas o trabalho de Antenucci *et al.* (2012) possui foco relacionado a modelagem matemática de metabolismo aquático.

A hidrodinâmica de lagos rasos é o principal fator para a distribuição de temperatura, nutrientes e oxigênio dissolvido, também influenciando a

distribuição/agregação de sedimentos, contaminantes e algas (Ji, 2008). Desta forma, utilizar um modelo baseado em processos pode integrar, em escalas espaciais e temporais refinadas, os processos que influenciam o balanço de oxigênio na coluna d'água, permitindo avaliar como fatores externos (ex. vento, precipitação) e fatores internos (ex. nutrientes, fitoplâncton, temperatura da água) do lago alteram o metabolismo aquático do ecossistema.

Em lagos rasos, o vento pode ser o fator dominante levando a heterogeneidade espacial e temporal da biomassa de fitoplâncton (Carrick *et al.*, 1993), agindo indiretamente ao afetar a concentração de nutrientes devido a partículas resuspensas, ou de forma direta ao re-suspender algas a partir do sedimento (Scheffer, 1998). Estudos demonstram a influência do vento na distribuição de fitoplâncton e nutrientes para lagos rasos subtropicais (Cardoso *et al.*, 2003; Cardoso e Motta-Marques, 2003; 2004a; 2004b; 2004c; 2009; Fragoso Jr. *et al.*, 2008). Outros estudos também demonstram que o metabolismo aquático em lagos rasos pode ter sua distribuição espacial influenciada pelo vento (Van de Bogert *et al.*, 2007; Hanson *et al.*, 2008, Staehr *et al.*, 2010b; Coloso *et al.*, 2011b; Antenucci *et al.*, 2012). Em lagos rasos subtropicais, estudos de metabolismo aquático são recentes e elaborados de maneira concentrada (*i.e.* sem levar em conta a distribuição espacial) (Marotta *et al.*, 2009; 2010; Roland *et al.*, 2010 e Tonetta, 2012), levando a conclusões pouco substanciais sobre como o metabolismo aquático realmente se comporta nestes sistemas em função do regime de ventos no local.

O metabolismo de lagos tem sido estimado com base em séries de dados de oxigênio obtidos por diversos equipamentos (e.g. Cole *et al.*, 2000; Gazeau *et al.*, 2005; Van de Bogert *et al.*, 2007; Sadro *et al.*, 2011; Giordano *et al.*, 2012). Entretanto, estes métodos não permitem separar as contribuições (GPP e R) por processos componentes. Além disso, possuem suas próprias limitações em analisar estes processos (Gazeau *et al.*, 2005; Lauster *et al.*, 2006), devido a dificuldade existente em separar/estimar os diferentes processos envolvidos principalmente na respiração do ecossistema (e.g. consumo por bactérias). A abordagem utilizada neste trabalho permite a visualização e quantificação dos fluxos de metabolismo (GPP e R), sendo possível avaliar quais compartimentos biológicos (algas, macrófitas aquáticas ou bactérias) influenciam em maior proporção na estimativa de metabolismo no

ambiente por meio dos processos que os compõem. O uso de um modelo baseado em processos, capaz de integrar processos físicos, químicos e biológicos em escalas de tempo e espaço refinadas, pode eventualmente estimar o metabolismo na Lagoa Mangueira (Litoral Sul do Rio Grande do Sul - Brasil) visando responder as seguintes perguntas: (1) Existe heterogeneidade espacial e/ou temporal no metabolismo aquático da Lagoa Mangueira?; (2) Como a hidrodinâmica influencia a distribuição espacial do metabolismo na Lagoa Mangueira?

2 HIPÓTESE

2.1 Hipótese

Em lagos rasos a hidrodinâmica, governada por ventos, altera substancialmente o metabolismo aquático do lago e induz padrões particulares de heterogeneidade espacial e temporal.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar como a hidrodinâmica influencia o metabolismo da Lagoa Mangueira.

3.2 Objetivos específicos

1. Verificar se ocorre heterogeneidade espacial e/ou temporal do metabolismo aquático na lagoa Mangueira;
2. Avaliar como o vento influencia a distribuição espacial do metabolismo na lagoa Mangueira.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

O Sistema Hidrológico do Taim (SHT) é uma extensa área úmida, com aproximadamente 2254 km², localizada no Sul do Rio Grande do Sul, compreendendo partes dos Municípios de Santa Vitória do Palmar e de Rio Grande entre as latitudes 32°20'S e 33°00' S, e pela Lagoa Mirim e o Oceano Atlântico sul entre as longitudes 52°20'W e 52°45'W. Devido a grande diversidade biológica presente no SHT, foi criada a Reserva Ecológica do Taim em 1991 e em 1992, o Sistema Hidrológico do Taim foi designado como local de pesquisa do Programa Brasileiro de Pesquisa Ecológica de Longa Duração, visando a continuidade dos estudos ecológicos dentro da reserva (Seeliger *et al.*, 2002).

O SHT recebe água de uma bacia um pouco maior do que a própria Lagoa Mangueira, ou seja, a maior parcela de entrada de água se dá por precipitação direta sobre o sistema. As saídas de água do sistema ocorrem basicamente por evaporação, demanda para irrigação e, quando o nível está alto, escoamento para a Lagoa Mirim por uma comporta (Paz, 2003; Villanueva, 1997). A Lagoa Mangueira (Figura 4.1) possui uma área superficial de 820 km² com profundidade média de 2,6 metros e máxima de 6,5 metros. O seu estado trófico varia de oligotrófico para mesotrófico, com concentração anual média de PO₄ de 35 mg/m³, variando de 5 a 51 mg/m³ (Fragoso Jr *et al.*, 2011). A lagoa é cercada por uma variedade de habitats, como praias, dunas, florestas e banhados.

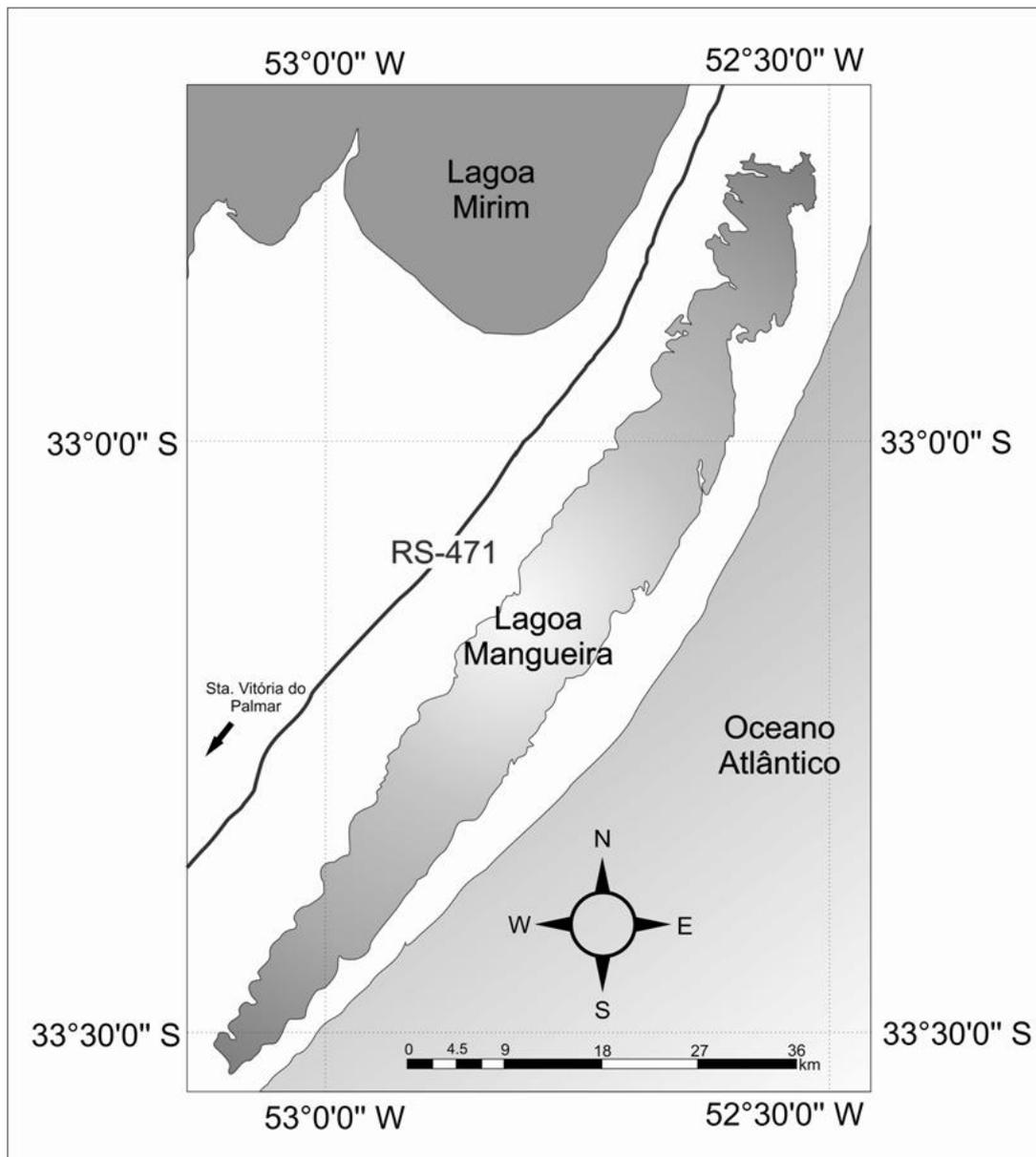


Figura 4.1 - Localização da lagoa Mangureira.

4.2 Modelo IPH-ECO

O modelo computacional utilizado neste trabalho será o IPH-ECO (Fragoso Jr. *et al.*, 2009b). O modelo descreve os componentes hidrodinâmicos, bióticos e abióticos mais importantes do meio ambiente aquático, podendo ser utilizado para avaliações isoladas de processos físicos, químicos ou biológicos, ou em avaliações onde estes processos interagem simultaneamente entre si. O módulo hidrodinâmico é baseado no modelo TRIM (Casulli, 1990; Cheng *et al.*, 1993), que utiliza uma abordagem Euleriana-Lagrangeana para a resolução das equações de momento e continuidade. A dinâmica química e biológica na coluna d'água e no sedimento é baseada em

grande parte no modelo PC-Lake (Janse, 2005). O modelo é capaz de descrever o ciclo completo de nutrientes (e.g. Fósforo, Nitrogênio) e oxigênio dissolvido, além disso, divide o fitoplâncton e os peixes em três grupos funcionais, divide as macrófitas aquáticas em quatro grupos funcionais e descreve de forma simplificada os fluxos bentônicos e a diagênese no sedimento. Algumas melhorias vêm sendo implementadas no modelo desde a sua elaboração. Em um trabalho recente (Fragoso Jr. *et al.*, 2011) o fluxo de re-suspensão de material a partir do sedimento foi alterado e colocado em função da pista livre do vento (“*fetch*”) e o fotoperíodo agora é determinado a partir da latitude do local estudado. Neste trabalho, foram realizadas as seguintes alterações no modelo:

- A distribuição da luz na coluna d’água foi revista, permitindo ao modelo atenuar a luz com maior precisão ao longo das camadas verticais;
- O coeficiente de turbulência na vertical (modelo hidrodinâmico) passou a ser função da temperatura da água (Pacanowski e Philander, 1981);
- a evaporação da água pode ser estimada pelo método de Penman (descrito em Fragoso Jr. *et al.*, 2009 – Págs. 70-75);
- Implementação de um critério de re-inicialização que salva os campos de concentração, velocidades, volumes e níveis a cada ¼ de simulação;
- Implementação de uma estratégia numérica que permite ao modelo estimar metabolismo aquático (GPP, R e NEP) baseando-se nos processos componentes do balanço de oxigênio dissolvido na coluna d’água;
- Melhorias na ferramenta de visualização dos campos de concentração, permitindo ao usuário visualizar em tempo real os valores de clorofila-a do fitoplâncton e seus grupos funcionais, e os fluxos componentes do balanço de oxigênio (incluindo os fluxos componentes do metabolismo).

O período estudado foi de 01 janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2006 (totalizando 2191 dias de simulação). Os dados de entrada do modelo (variáveis meteorológicas e condições de contorno) e os dados de qualidade da água e hidrodinâmicos (usados na calibração) são os mesmos utilizados por Fragoso Jr. *et al.* (2011), assim como o passo de tempo de simulação (30 segundos). Apesar das alterações implementadas, não foi necessário calibrar o modelo novamente. A simulação foi realizada utilizando uma discretização em

grade estruturada, onde cada célula possui dimensões 500x500 m. Não foi levada em conta a discretização vertical uma vez que não há dados de campo (no período avaliado) para validar as saídas do modelo. As condições iniciais utilizadas em cada simulação são derivadas do final da própria simulação. Desta forma, as condições iniciais do modelo foram obtidas a partir de uma situação estabilizada, visando eliminar o efeito das condições iniciais nos resultados.

4.2.1 Dados de entrada do modelo – Variáveis meteorológicas

As séries meteorológicas utilizadas foram coletadas em um posto meteorológico localizado na parte central lagoa Mangueira para o período de 2001 a 2006. Neste trabalho foram utilizadas séries horárias de radiação solar de onda curta, temperatura do ar e velocidade do vento e séries diárias de precipitação, umidade e evaporação. Tendo em vista que o vento é o principal agente controlador da hidrodinâmica na lagoa Mangueira (Fragoso Jr. *et al.* 2008; 2011), a seguir serão apresentadas as análises referentes aos dados de vento (direção e magnitude), pois esta será a única série a sofrer perturbações para a definição dos cenários.

A série de vento (direção e magnitude) foi analisada utilizando o software WRPLOT. Com o auxílio desta ferramenta é possível gerar uma Rosa dos Ventos (Figura 4.2) e analisar as magnitudes das ocorrências registradas (Figura 4.3). Ao se analisar as direções do vento (Figura 4.2), é possível observar que há um predomínio de ventos soprando a partir da direção nordeste, ocorrendo aproximadamente 23% do tempo. Outras direções que podem ser destacadas incluem a direção norte e oeste, ocorrendo aproximadamente 15% do tempo.

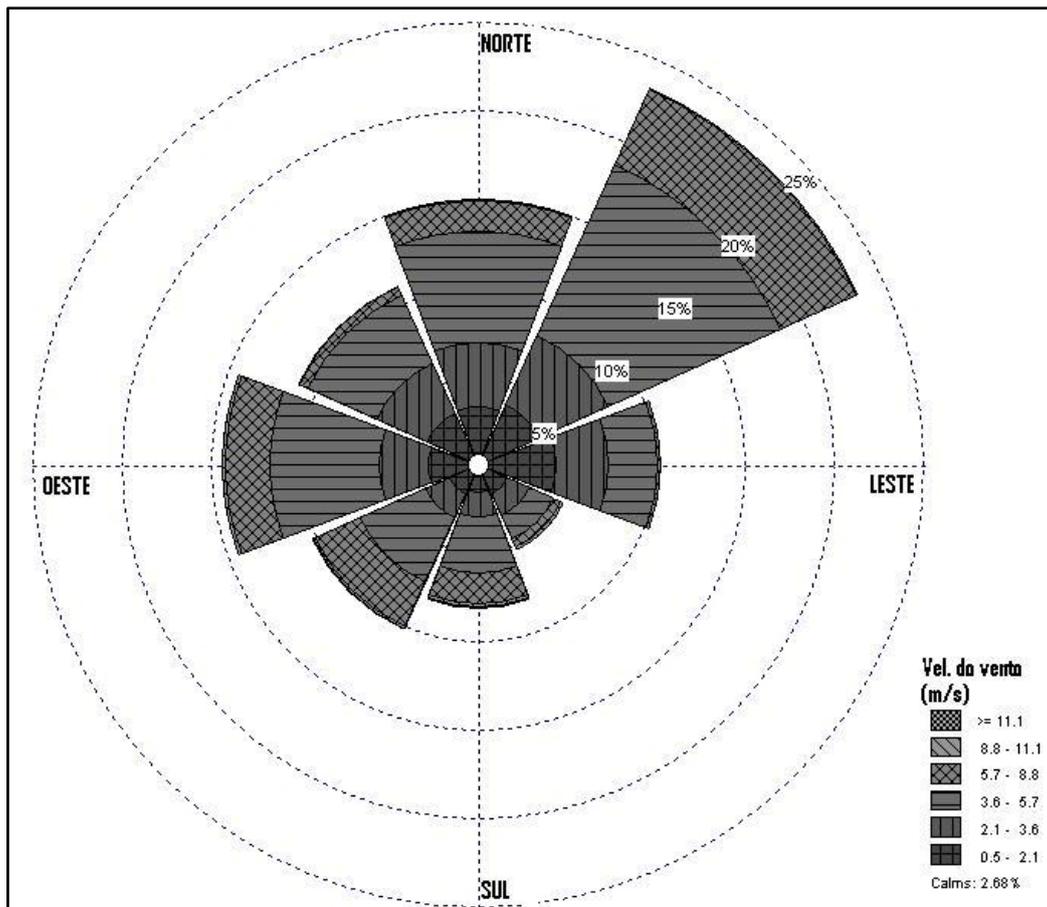


Figura 4.2 - Ventos dominantes para a lagoa Mangueira entre 2001 a 2006.

Pode ser observado a partir das magnitudes (velocidades) dos ventos, que as velocidades variam entre as classes intermediárias de vento (Figura 4.3). A série apresenta ventos de 3,6 m/s a 5,7 m/s em 38,4% do tempo, seguido por ventos de 2,1 m/s a 3,6 m/s em 20,9 % do tempo e ventos de 0,5 m/s a 2,1 m/s em 22,7 % do tempo.

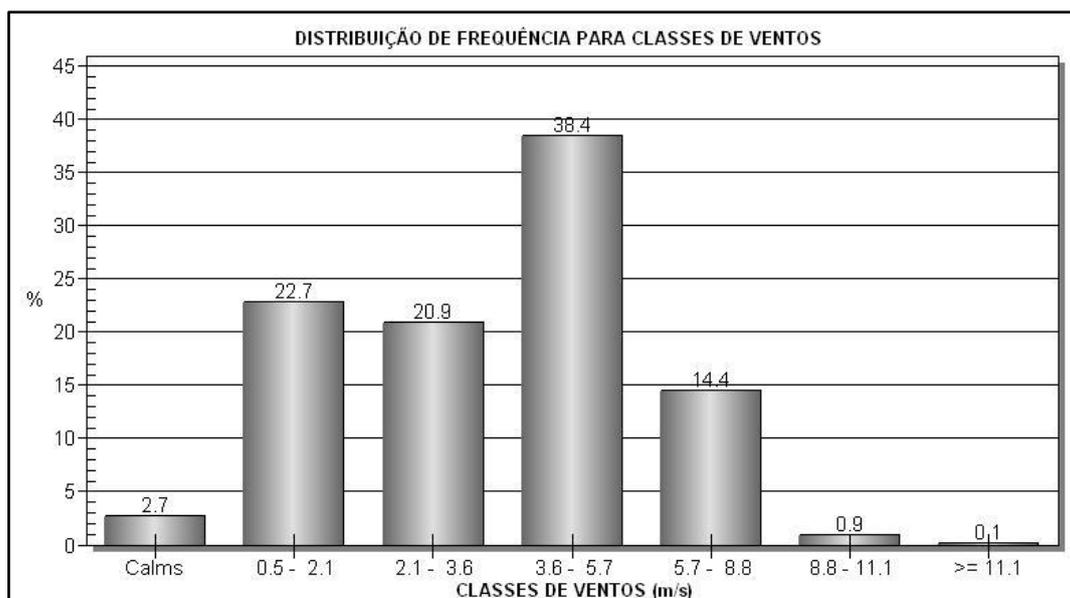


Figura 4.3 - Distribuição das ocorrências do vento com relação a sua magnitude.

4.2.2 Dados de entrada do modelo – Condições de contorno

As condições de contorno utilizadas na simulação da lagoa mangueira são as vazões de entrada (bacias de contribuição), vazões de saída (irrigação de campos de arroz) e a carga de nutrientes (ortofosfato, nitrato, amônia e sílica) oriundos das bacias de contribuição. A metodologia para determinação das concentrações, vazões de entrada e vazões de saída é apresentada em detalhes no trabalho de Fragoso Jr. *et al.* (2011).

Campanhas de campo possibilitaram a observação de que as concentrações de nutrientes possuem um pico distinto, C_0 , imediatamente após as lavouras serem imersas em Outubro, ou após o início do período de cultivo de arroz (Novembro). A partir deste ponto, a concentração de nutrientes decai exponencialmente até o início do próximo período de cultivo, começando um novo ciclo anual. Dezesseis sub-bacias foram delimitadas (Figura 4.4) para a bacia da Lagoa Mangueira. A conversão chuva-vazão foi realizada utilizando o modelo IPH-II (Tucci, 2001), com um intervalo de tempo horário. A vazão de saída (para irrigação dos campos de arroz) e os parâmetros do modelo hidrológico adotados se mostraram razoáveis, permitindo ao modelo simular satisfatoriamente o nível observado na lagoa (Fragoso Jr. *et al.*, 2011). Foi adotada uma retirada de água de 1170,84 m³/s/dia no período de janeiro e fevereiro, caindo pela metade em março e zerando no período de abril a

novembro. Em dezembro a irrigação se inicia novamente com o mesmo valor adotado em março. Este cenário de irrigação se repete para todos os anos.

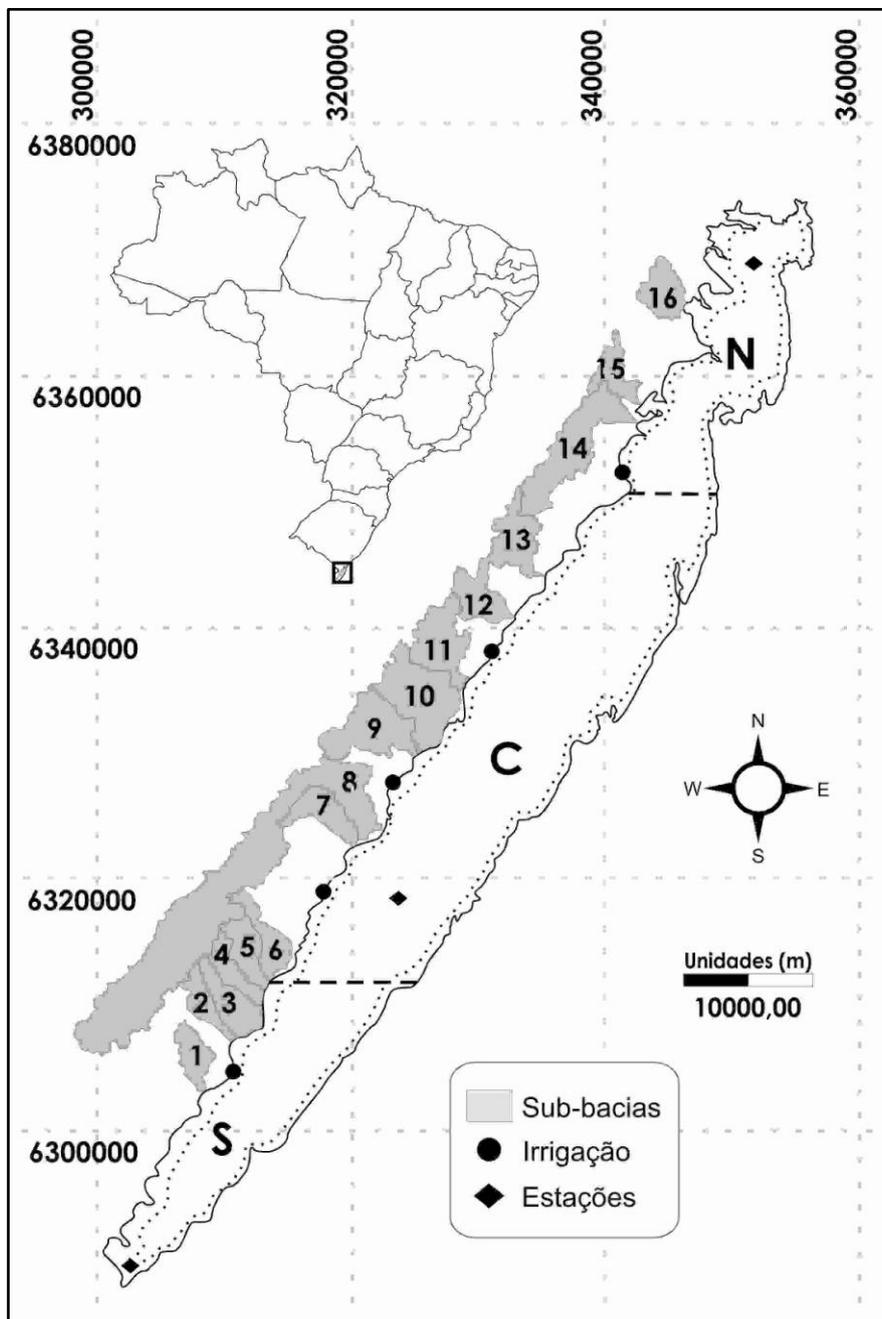


Figura 4.4 - Lagoa Mangueira. São mostradas sub-bacias, pontos onde ocorrem bombeamento de água para irrigação e as estações de monitoramento onde foram coletadas as séries meteorológicas e os dados de qualidade da água (TAMAS, TAMAC, TAMAN). Uma linha pontilhada (...) demarca a separação estimada entre a zona limnética e a zona litorânea. A linha tracejada (---) demonstra a separação entre a zona Norte (N), a zona Central (C) e a zona Sul (S).

4.3 Estimativa do metabolismo baseada em processos

A modelagem matemática do metabolismo aquático foi baseada no modelo de Odum (1956). Para a Lagoa Mangueira, o componente “A” da Equação de Odum (Equação 1) foi segmentado, com o intuito de incluir os diversos processos contribuintes para o consumo e produção de oxigênio. A separação dos processos levou em conta os conceitos apresentados em Odum (1956) e Staehr *et al.* (2010b) para cada termo da Equação (1). Os processos utilizados pelo modelo para descrever o balanço de oxigênio dissolvido no modelo IPH-ECO são:

- Balanço de O₂ na água = Entrada de O₂ na água por rios afluentes – Saída de O₂ na água por rios efluentes + Reaeração – Mineralização – Nitrificação – Demanda de oxigênio no sedimento + Produção algal + Produção pelas macrófitas aquáticas – Respiração algal – Respiração pelas macrófitas aquáticas + Produção de O₂ pela assimilação de nitrato pelas algas + Produção de O₂ pela assimilação de nitrato pelas macrófitas aquáticas – Alteração na concentração devido à deposição de sedimentos.

Este trabalho não levou em conta a simulação de processos associados à macrófitas aquáticas. Foi necessário dividir os processos componentes do balanço de oxigênio dissolvido do modelo IPH-ECO nas variáveis mostradas pela Equação 1 (Tabela 4.1), permitindo ao modelo estimar o metabolismo da lagoa Mangueira baseando-se nos processos que o compõe.

Tabela 4.1 - Separação dos processos componentes do metabolismo aquático.

Termo da Equação (1)	Processos no modelo IPH-ECO
GPP	produção algal
R	mineralização, nitrificação, Respiração algal
F	Reaeração
A	entrada externa de O ₂ no sistema, saída de O ₂ no sistema, demanda de oxigênio no sedimento, consumo de nitrato pelas algas, alteração na concentração devido à deposição de sedimentos

4.4 Zoneamento da Lagoa Mangueira

Para a avaliação do metabolismo (GPP, R e NEP) a Lagoa Mangueira foi dividida em regiões, considerando-se regiões geográficas (norte, centro e

sul) e zonas biológicas (zona limnética e zona litorânea). A separação geográfica foi realizada levando em conta as observações de campo, as quais demonstraram variações ao longo da lagoa permitindo a divisão em três regiões (Figura 4.4). A separação biológica levou em conta a Equação (2) (Ji, 2008, págs. 514/515), que relaciona a profundidade da zona eufótica do lago com a profundidade de Secchi.

$$D = -\ln\left(\frac{I(D)}{I_s}\right) \cdot \frac{Z_s}{C} \quad (2)$$

onde $I(D)/I_s = 0,01$ é a porcentagem de energia luminosa que chega no limite da zona eufótica do lago, C é uma constante com valores típicos variando entre 1,7 e 1,9 e Z_s é a profundidade de Secchi. A profundidade de Secchi utilizada para o cálculo foi o valor médio encontrado para os três postos de monitoramento da lagoa (TAMAS, TAMAC e TAMAN) para todo o período estudado. O valor de C adotado foi o valor médio da faixa (1,8). Desta forma, foi possível determinar a profundidade da zona eufótica para a lagoa Mangueira, separando a lagoa em zona limnética e zona litorânea (Figura 4.5) a partir da informação de batimetria existente.

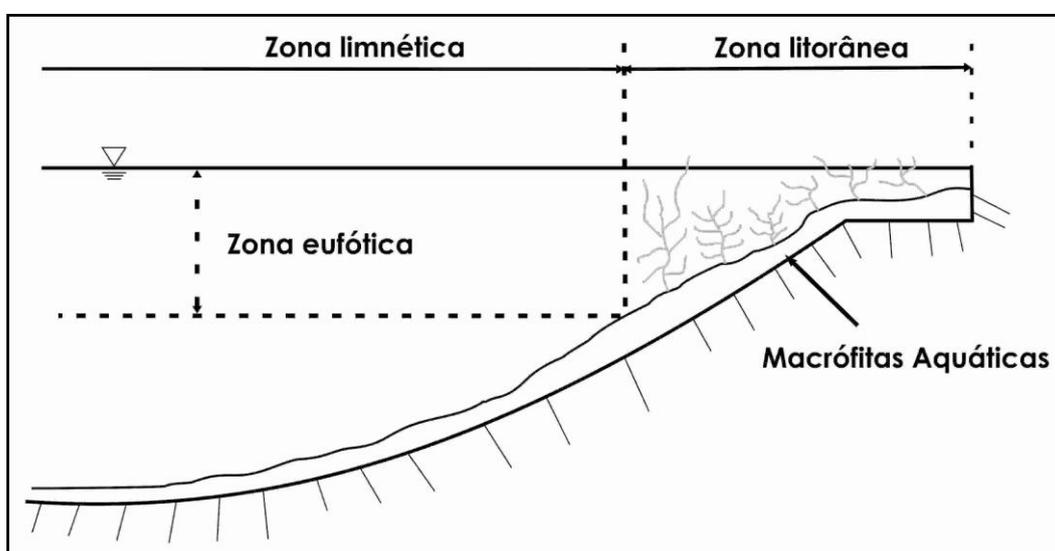


Figura 4.5 - Separação da lagoa em zonas biológicas (adaptado de Ji, 2008).

4.5 Cenários de simulação

As séries sintéticas de vento que foram utilizadas nos diferentes cenários foram derivadas da série original, coletada na parte central da lagoa Mangueira no período de 2001 a 2006. A partir de análises estatísticas dos

dados (Figura 4.2 e Figura 4.3), foi possível montar cenários de avaliação. Os cenários adotados visaram explorar ao máximo a influência da direção do vento nas estimativas do metabolismo. Os cenários utilizados neste trabalho foram os seguintes:

- Cenário com vento observado (0): Cenário de controle, utilizando a série de ventos real;
- Cenário sem vento (1): Simulação da lagoa sem o vento influenciando a hidrodinâmica;
- Cenário com direções opostas (2): Troca das direções originais de vento pelas direções opostas;
- Cenário com vento constante (3): Regime de vento constante (Dir=NE, vel.=4,65 m/s) até o sistema atingir o regime permanente;
- Cenário com velocidade dobrada (4): Vento com direções originais e intensidade igual ao dobro da real.

A escolha da direção nordeste (NE) para o cenário 3 se deve ao fato desta direção ser a mais freqüentes ocorrendo na lagoa para o período avaliado (Figura 4.2) e a velocidade de 4,65 m/s adotada corresponde a velocidade média para a classe que ocorre com mais freqüência (Figura 4.3).

4.6 Análise dos resultados

As saídas do modelo para a análise dos resultados foram em escala horária. Ou seja, cada série temporal avaliada possui uma saída de hora em hora ao longo dos 2191 dias de simulação. O modelo possui saídas em todas as células computacionais, abrangendo todos os ambientes da lagoa (zonas biológicas e regiões geográficas – Figura 4.4). As análises realizadas utilizaram séries com valores médios diários. As séries temporais para os ambientes da Lagoa Mangueira foram obtidas calculando a média volumétrica (de cada variável em cada célula) para todas as células que compõem cada ambiente. O software MatLab[®] foi utilizado nas análises de variância (ANOVA) utilizando um limite de significância de 5% e na confecção dos gráficos. Para comparar os resultados entre cenários foi utilizada a diferença média, representada pela equação (3):

$$\textit{Diferença Média} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{1,i} - X_{2,i})}{N} \quad (3)$$

onde $X_{1,i}$ e $X_{2,i}$ são os valores comparados e N é o número total de elementos utilizados na comparação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Balanço de oxigênio e processos componentes do metabolismo

Os fluxos componentes do balanço de oxigênio apresentaram variações entre si (Figura 5.1). O fluxo de reaeração apresentou valores, aproximadamente, dez vezes maiores que os valores encontrados para NEP. Os valores de reaeração variaram entre -0,15 e 0,18 gO₂/m³/dia, ao passo que os valores de NEP variaram entre -0,03 e 0,015 gO₂/m³/dia. Ambos apresentaram comportamento sazonal, variando entre estações do ano. O termo A apresentou pouca variação sazonal quando comparado ao NEP e a reaeração. Os valores desse termo se mantiveram entre 0,00 e 0,01 gO₂/m³/dia. Os comportamentos encontrados para a Lagoa Mangueira como um todo foram observados em todos os ambientes delimitados (regiões geográficas e zonas biológicas). A concentração de oxigênio dissolvido variou entre 8,5 e 10,9 g/m³, apresentando a característica de ser maior no inverno.

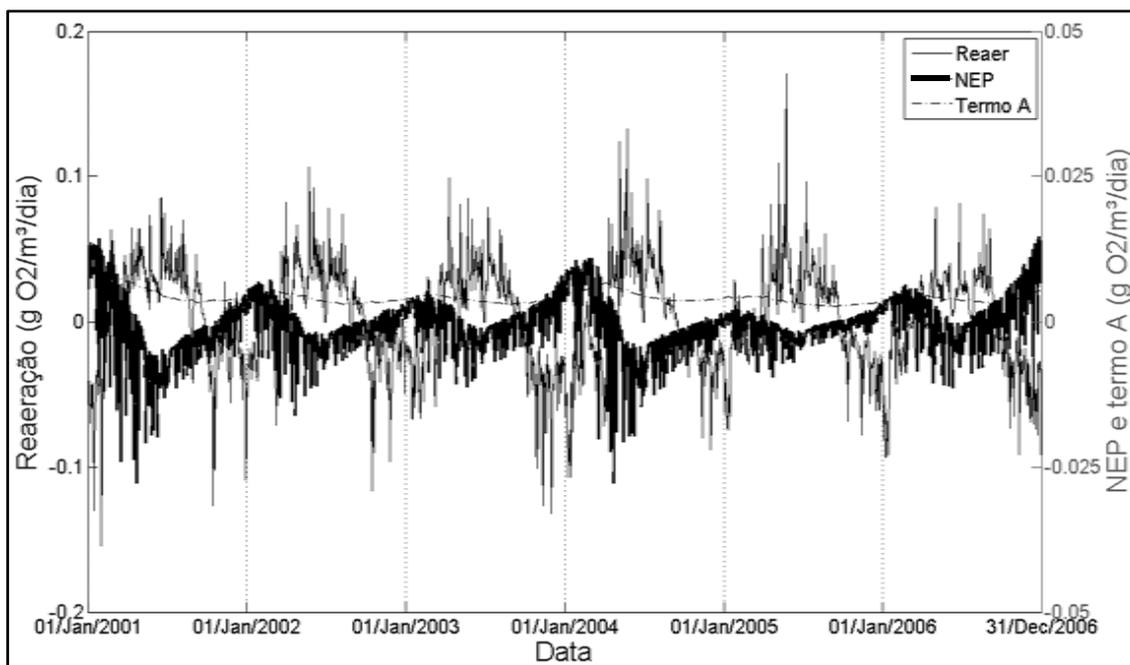


Figura 5.1 - Comparação entre os fluxos componentes do balanço de oxigênio para a Lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.

O fluxo de reaeração apresentou sazonalidade similar à concentração de oxigênio (Figura 5.2), o contrário sendo observado para o NEP. Os picos de NEP ocorrem nos períodos de menor concentração de oxigênio (Figura 5.3). Estes comportamentos podem indicar que o balanço de oxigênio da lagoa

Mangueira é influenciado, em maior escala, pelo fluxo de reaeração com a atmosfera do que pelo metabolismo da lagoa.

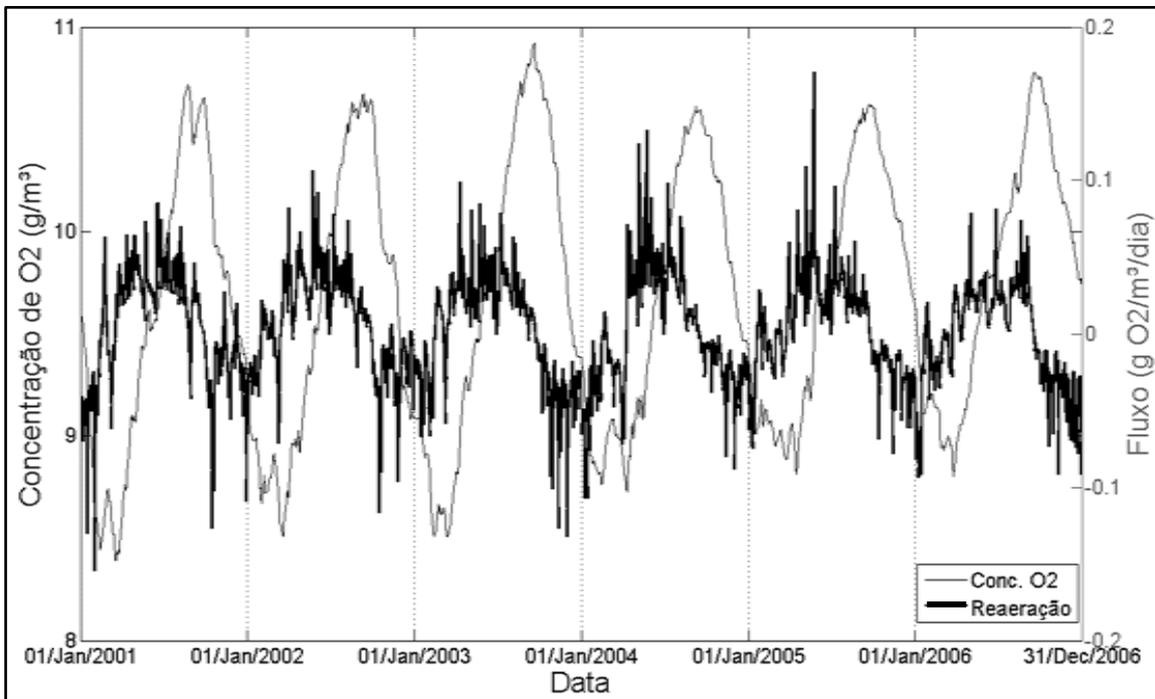


Figura 5.2 - Comparação entre a concentração de oxigênio e o fluxo de reaeração na lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.

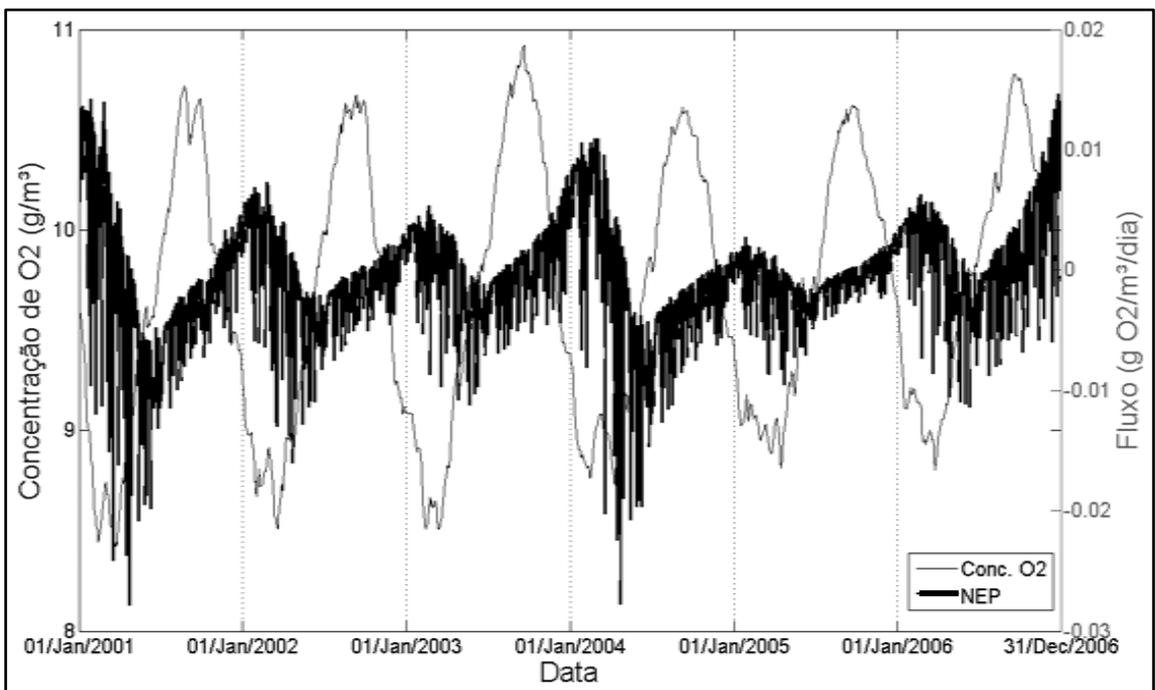


Figura 5.3 - Comparação entre NEP e a concentração de oxigênio para a Lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.

O fluxo de respiração na lagoa Mangueira foi composto pela respiração do fitoplâncton, mineralização e nitrificação (Figura 5.4), não sendo observadas alterações na ordem de importância dos processos componentes da respiração do ecossistema entre regiões ou zonas biológicas.

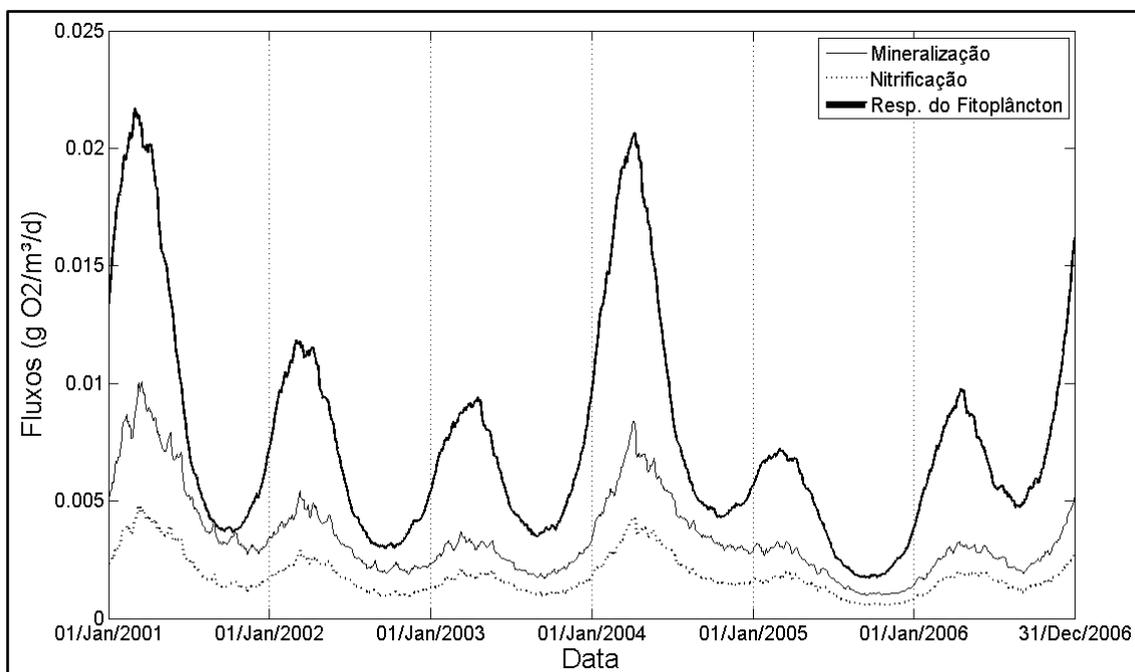


Figura 5.4 - Processos componentes da respiração do ecossistema para a Lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.

Valores similares entre o fluxo de reaeração e as taxas de metabolismo em lagos temperados, demonstram que o NEP pode explicar grande parte da variação na concentração de oxigênio dissolvido (Hanson *et al.*, 2008 e Staehr *et al.*, 2010). Nossos resultados mostram que a reaeração possui valores maiores que os valores estimados para NEP, indicando que o fluxo para a atmosfera é mais incisivo na dinâmica do oxigênio do que a produção do ecossistema. Os valores de reaeração estimados neste trabalho não são maiores que valores encontrados em lagos temperados (Cole *et al.*, 2000; Hanson *et al.*, 2008) nem em lagos subtropicais com regime de ventos similar (Tsai *et al.*, 2011). Isto indica que os processos físicos (reaeração) podem ser mais importantes que os processos biológicos (GPP e R) na dinâmica de oxigênio da Lagoa Mangueira. Águas turbulentas podem ser capazes de gerar fluxos de maior magnitude entre a superfície da água e a atmosfera (Lauster *et al.*, 2006). A hidrodinâmica da Lagoa Mangueira é controlada pelo vento (Fragoso Jr. *et al.*, 2011). Desta forma, o fluxo de reaeração pode controlar a

dinâmica de oxigênio devido a grande área superficial existente na Lagoa Mangueira, que permite a geração de um *fetch* de até 90 km (Fragoso Jr. *et al.*, 2011), apresentando padrões de circulação e mistura intensos.

O termo A da equação de Odum (1956) é constantemente desprezado nos trabalhos que utilizam abordagens baseadas no balanço de oxigênio (e.g. Cole *et al.*, 2000; Lauster *et al.*, 2006, Staehr *et al.*, 2010). Nossos resultados sugerem que a magnitude do termo A com relação ao fluxo de re-aeração e ao metabolismo é pequeno. Entretanto, um trabalho mais aprofundado seria necessário para considerar desprezível a influencia deste termo sobre o balanço de oxigênio na lagoa Mangueira.

5.2 Metabolismo: Variação sazonal e espacial

O metabolismo da Lagoa Mangueira (Figura 5.5) se mostrou variável ao longo do tempo de simulação, demonstrando uma alternância entre períodos de autotrofia ($NEP > 0$) em 898 dos dias simulados (41,0% do tempo), predominantemente no verão e heterotrofia ($NEP < 0$) em 1293 dos dias simulados (59,0% do tempo), predominantemente no inverno.

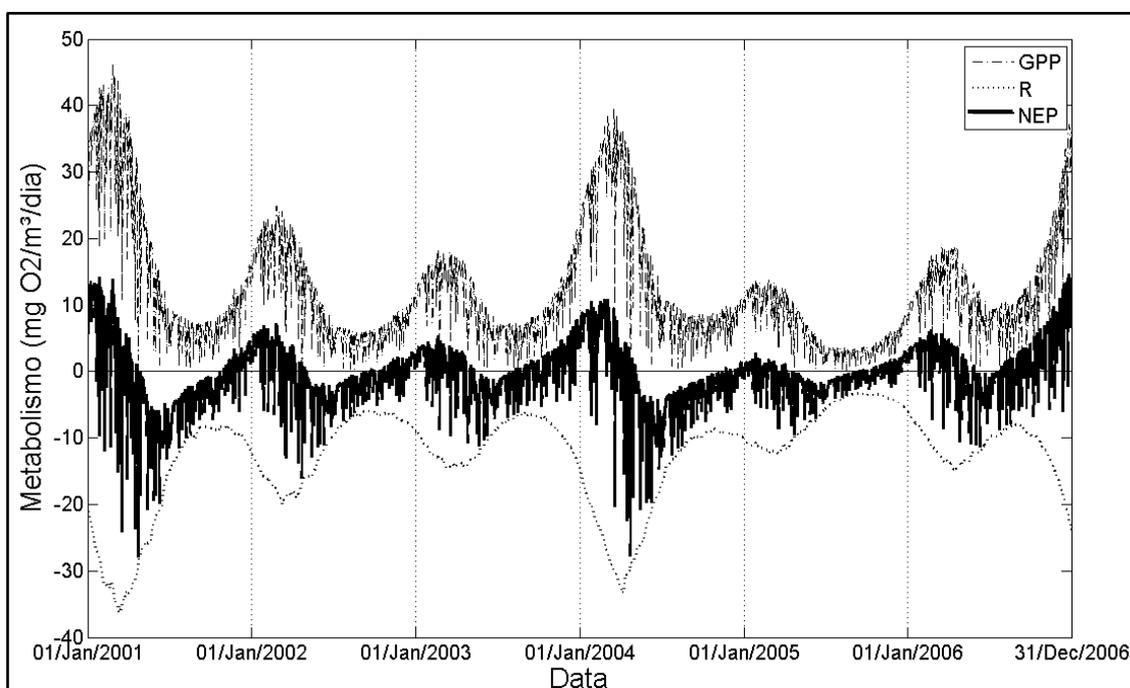


Figura 5.5 - Estimativa de metabolismo para a Lagoa Mangueira como um todo no cenário com vento observado. Uma linha contínua marca o eixo onde $GPP=R$.

As estimativas de GPP e NEP são maiores na zona litorânea (Figura 5.6 – GPP e Figura 5.7 – NEP). Esta zona se apresentou mais produtiva do que a zona limnética, resultado num comportamento autotrófico na maior parte do tempo. O GPP apresentou uma diferença média de 10,1 mgO₂/m³/dia ao compararmos as estimativas da zona litorânea e da zona limnética. O NEP apresentou uma diferença média de 8,8 mgO₂/m³/dia. A diferença média nas estimativas de R entre zonas biológicas (Figura 5.8) foi pequena quando comparada a diferença média nas estimativas de GPP e NEP, apresentando um valor de 1,3 mgO₂/m³/dia.

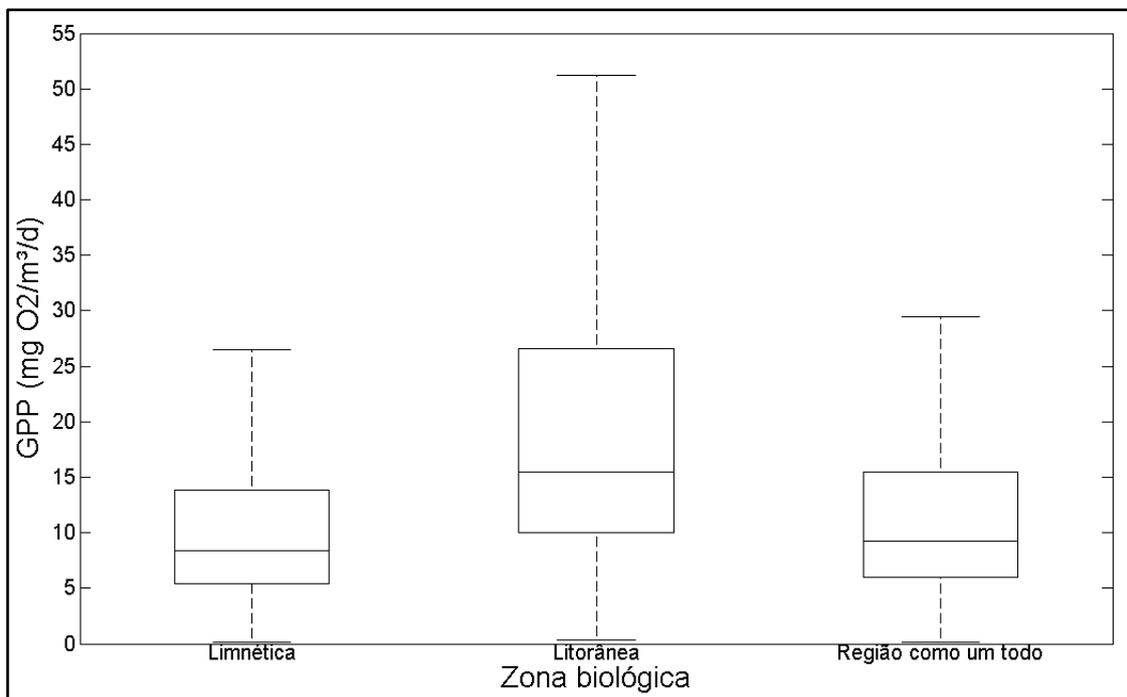


Figura 5.6 – Box-plot do GPP entre as zonas biológicas delimitadas para a lagoa Mangureira. Cenário com vento observado.

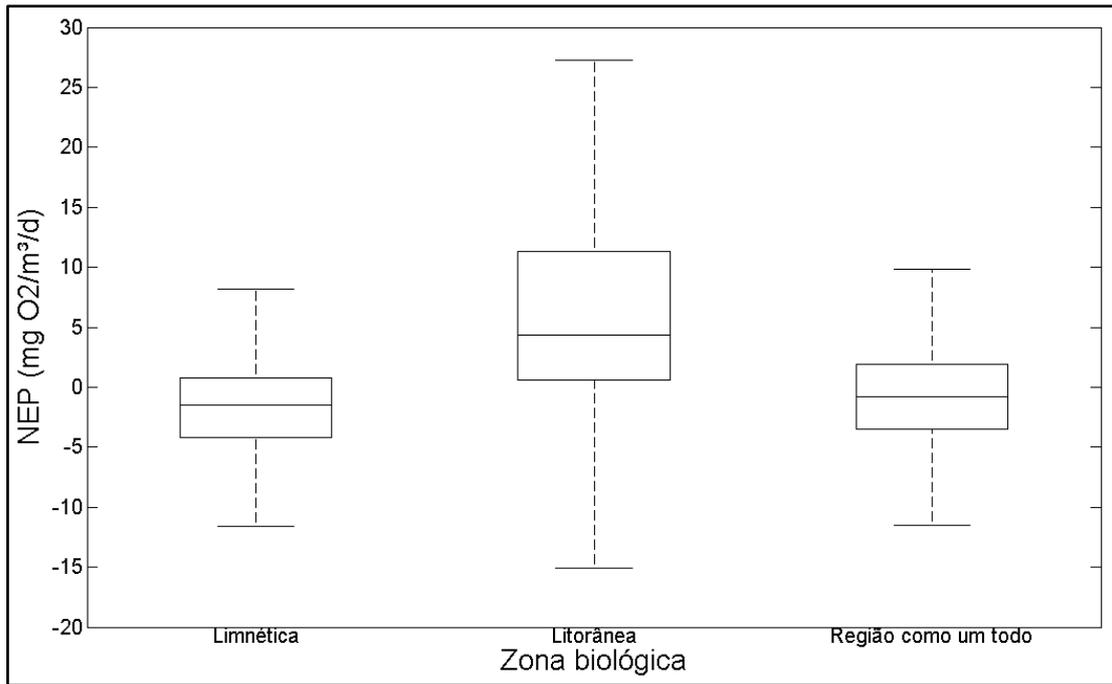


Figura 5.7 - Box-plot do NEP entre as zonas biológicas delimitadas para a lagoa Mangureira. Cenário com vento observado.

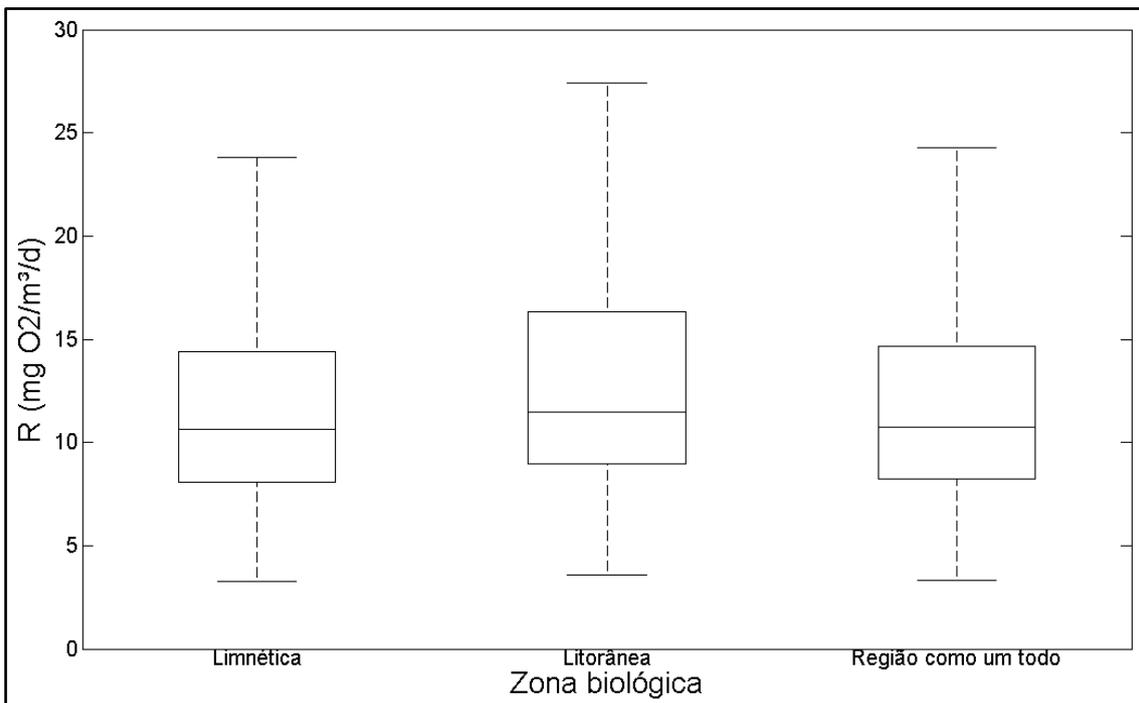


Figura 5.8 - Box-plot de R entre as zonas biológicas delimitadas para a lagoa Mangureira. Cenário com vento observado.

As regiões geográficas delimitadas apresentaram o mesmo comportamento sazonal encontrado para a Lagoa Mangureira como um todo.

Entretanto, cada região alternou entre períodos autotróficos e heterotróficos de forma diferente da encontrada para a Lagoa Mangueira como um todo (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Período de tempo em condição autotrófica e condição heterotrófica por região geográfica na Lagoa Mangueira.

Região	Período Autotrófico	Período Heterotrófico
Norte	997 dias (45,5% do tempo)	1194 dias (54,5% do tempo)
Centro	836 dias (38,2% do tempo)	1355 dias (61,8% do tempo)
Sul	922 dias (42,1% do tempo)	1269 dias (57,9% do tempo)

A diferença média entre a zona litorânea e a zona limnética também variou entre as regiões. Para GPP, a região Sul apresentou a maior diferença (10,1 mgO₂/m³/dia), sendo seguida pela região Central (9,4 mgO₂/m³/dia) e a região Norte (9,3 mgO₂/m³/dia) com diferenças médias similares. Para R a região Sul continuou apresentando a maior diferença média entre zonas biológicas (1,2 mgO₂/m³/dia). A região Central e a região Norte apresentaram valores iguais (0,5 mgO₂/m³/dia). O NEP entre as regiões apresentou pouca diferença média pouco quando comparada as diferenças em GPP e R. As regiões Central e Sul apresentaram diferença média igual (8,9 mgO₂/m³/dia), tendo a região Norte apresentado uma diferença média um pouco menor (8,7 mgO₂/m³/dia) quando comparada as outras duas.

As estimativas de metabolismo apresentaram valores maiores na região Norte. A diferença entre as medianas das regiões são mais perceptíveis para GPP (Figura 5.9) e R (Figura 5.10). As medianas entre regiões para NEP (Figura 5.11) apresentaram valores mais próximos do que as medias para GPP e R.

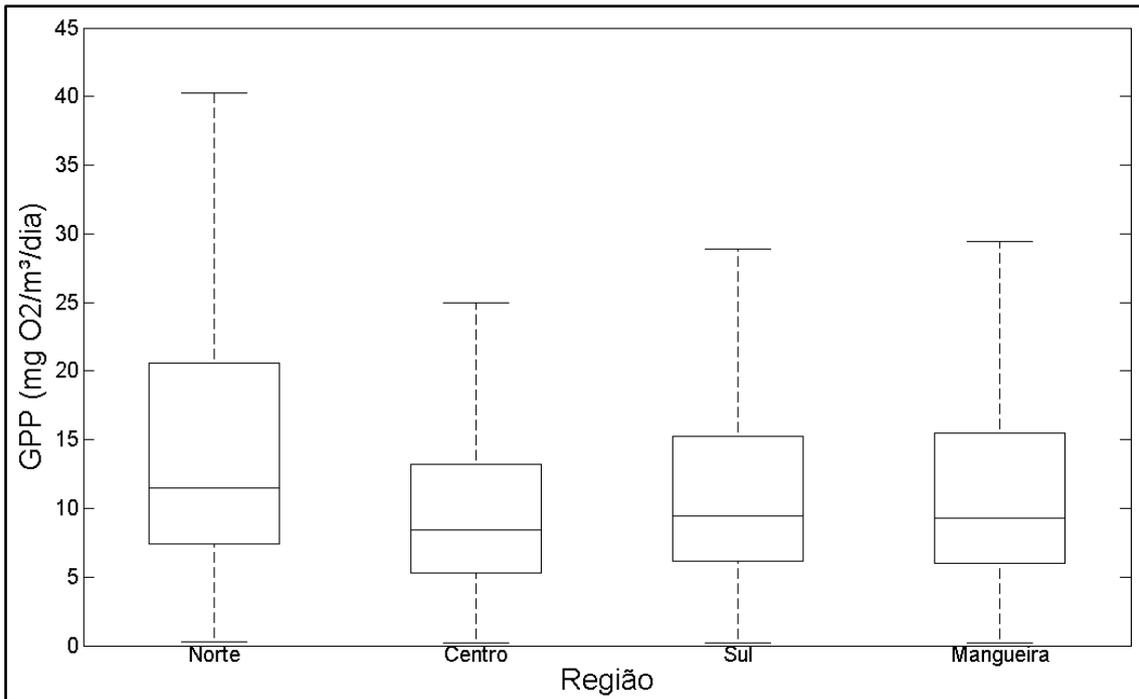


Figura 5.9 - Box-plot de GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.

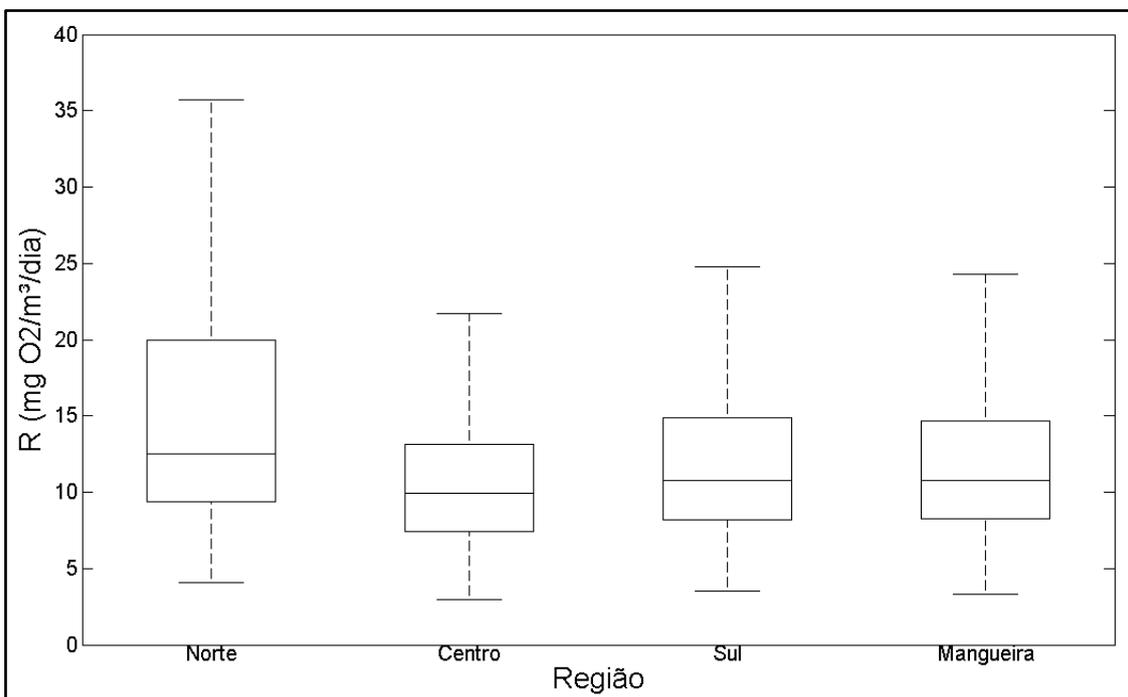


Figura 5.10 - Box-plot de R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.

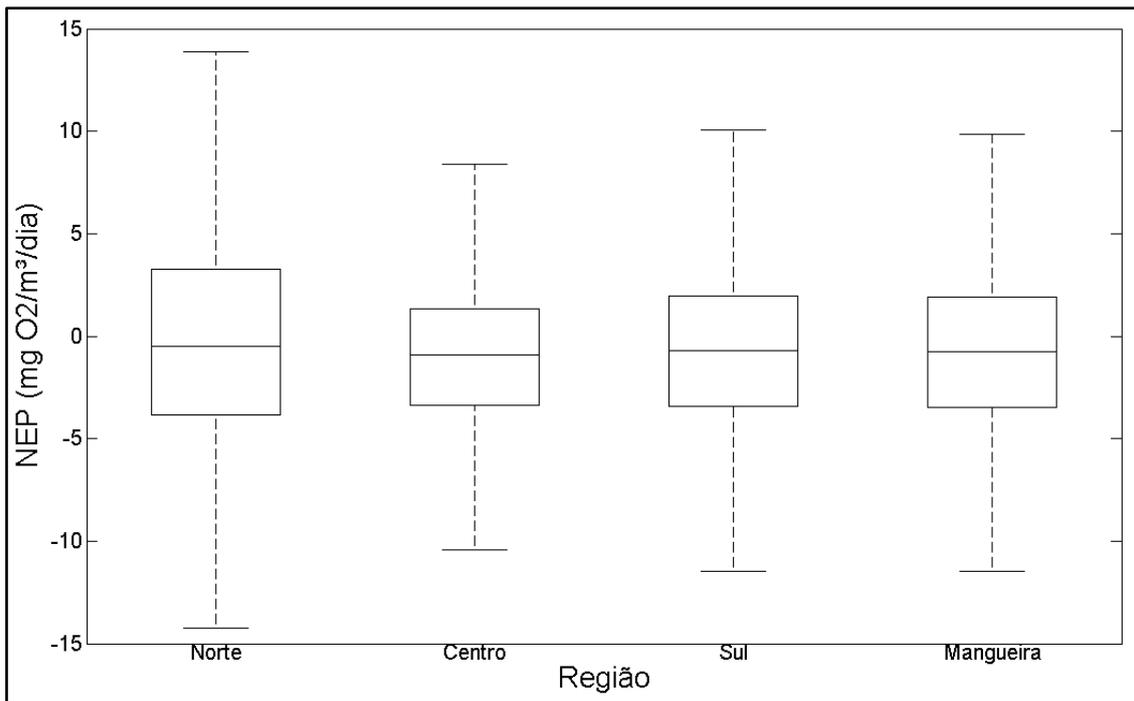


Figura 5.11 - Box-plot de NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.

A diferença média entre as séries estimadas de GPP entre a região Norte e a região Central foi 5,05 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,05), entre a região Norte e a região Sul de 3,81 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,05). O mesmo valor foi encontrado entre a região Norte e a Lagoa Mangueira como um todo (p -value < 0,05). Entre a região Central e a região Sul a diferença média foi de -1,23 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,05), o mesmo sendo encontrado entre a região Central e a Lagoa Mangueira como um todo (p -value < 0,05). Entre a região Sul e a Lagoa Mangueira como um todo, a diferença média foi menor que 0,00 mgO₂/m³/dia (p -value > 0,05). Para R, a diferença média nas séries estimadas entre as regiões Norte e Central foi de 4,24 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,05), entre a região Norte e a região Sul foi de 3,32 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,05) e entre a região Norte e a Lagoa Mangueira como um todo de 3,24 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,05). A diferença média nas séries estimadas de R entre a região Central e a região Sul foi de -0,92 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,05) e entre a região Central e a lagoa Mangueira como um todo de -1,00 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,05). Entre a região Sul e a lagoa como um todo, a diferença média foi de -0,09 mgO₂/m³/dia (p -value > 0,05). A diferença média nas séries temporais de NEP estimadas entre a região Norte e a região Central foi de 0,81 mgO₂/m³/dia (p -

value < 0,05), entre a região Norte e a região Sul foi de 0,49 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,05) e entre a região Norte e a Lagoa Mangueira como um todo foi de 0,58 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,05). A diferença média entre a região Central e a região Sul foi de -0,32 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,05) e entre a região Central e a Lagoa Mangueira como um todo foi de -0,23 mgO₂/m³/dia (*p-value* > 0,05). A região Sul obteve diferença média de 0,09 mgO₂/m³/dia (*p-value* > 0,05) quando comparada a lagoa como um todo.

Os valores de GPP e R estimados neste trabalho foram menores que os encontrados por outros autores em lagos de clima temperado (e.g. Hanson *et al.*, 2003; Staehr e Sand-Jensen, 2007; Sadro *et al.*, 2011; Van de Bogert *et al.*, 2012) e em lagos de clima subtropicais (Tsai *et al.*, 2008) (Tabela 5.2). Desta forma, os valores de GPP e R estimados neste trabalho sugerem que a Lagoa Mangueira possui baixa produção e consumo de oxigênio quando comparada a outros lagos. O valor médio de clorofila-a, para a Lagoa Mangueira como um todo, estimado pelo modelo (média de 1,8 µg/L) difere dos dados levantados em campo (média de 12,8 µg/L) (Crossetti *et al.*, 2012). Este pode ser um dos fatores que levaram as baixas taxas de GPP e R encontradas neste estudo.

Tabela 5.2- Valores de metabolismo estimados em outros trabalhos.

Lago(a)	GPP (g O ₂ /m ³ /dia)	R (g O ₂ /m ³ /dia)	NEP (g O ₂ /m ³ /dia)	Referência
Mangueira	0,012	0,013	-0,001	Este trabalho
Allequash	1,094	1,267	-0,173	
East Long	0,816	1,469	-0,653	
Trout Bog	1,571	1,126	0,445	
Trout lake	0,234	0,237	-0,003	
West Long	0,950	1,258	-0,307	
Crampton	0,122	0,442	0,320	
Sparkling	0,330	0,281	0,054	Van de Bogert <i>et al.</i> (2012)
Peter	0,469	0,384	0,085	
Emerald	0,369	0,297	0,032	
Slotsso	2,384	2,720	-0,340	Staeher e Sand-Jensen (2007)
Yuan-Yang**	0,373	1,932	-1,590	Tsai <i>et al.</i> (2008)

* **Obs:** Valores médios encontrados nos estudos.

** Clima subtropical

A sazonalidade encontrada nas estimativas de metabolismo para a Lagoa Mangueira como um todo e para as regiões geográficas delimitadas, apresenta variação acentuada entre inverno (período de menor produção) e verão (período de maior produção). As regiões geográficas demonstraram comportamento diferente com relação ao período em condição autotrófica e heterotrófica. Tendo a região Norte apresentado o maior período em condição

autotrófica e a região Central o maior período em condição heterotrófica. A Lagoa Mangueira como um todo se apresentou heterotrófica na maior parte do tempo simulado. A variação entre estações é encontrada em outros estudos (e.g. Hanson *et al.*, 2006; Staehr e Sand-Jensen, 2007; Staehr *et al.*, 2010; Sadro *et al.*, 2011) e é frequentemente relacionada a concentração de clorofila-a (e.g. Hanson *et al.*, 2006; Staehr e Sand-Jensen, 2007). Não há padrões similares aos encontrados nas estimativas de metabolismo nos dados meteorológicos de entrada do modelo (e.g. precipitação, evaporação, radiação). Entretanto, a série temporal de biomassa de fitoplâncton possui comportamento inter-anual similar aos fluxos de metabolismo (um pico acentuado no verão de 2004). Este trabalho não conseguiu identificar uma variável responsável por este comportamento inter-anual, mas os resultados sugerem que uma coleção de variáveis, como: precipitação, radiação, concentração de nutrientes, coeficiente de extinção da luz, possam influenciar a variação inter-anual nas estimativas de biomassa de fitoplâncton e consequentemente de metabolismo.

As variações nas estimativas de metabolismo entre zonas biológicas podem ser atribuídas à concentração de clorofila-a, pois a biomassa de fitoplâncton é maior na zona litorânea (Figura 5.12). Em todas as regiões geográficas a zona litorânea apresentou estimativas maiores de GPP, R e clorofila-a. Esta maior concentração na zona litorânea já foi estimada (Fragoso *et al.*, 2008; 2011) e observada (Crossetti *et al.*, 2012) para a Lagoa Mangueira em outros trabalhos. As variações no GPP foram maiores que as variações existentes em R e na biomassa de fitoplâncton, levando as zonas litorâneas a apresentarem tendência autotrófica na maior parte do tempo. O contrário foi observado nas zonas limnéticas, onde o comportamento foi mais similar ao comportamento das regiões como um todo, e teve tendência a ser mais heterotrófico na maior parte do tempo. Outros trabalhos demonstram existir diferenças entre as estimativas de metabolismo em zonas biológicas em lagos (Lauster *et al.*, 2006; Van de Bogert *et al.*, 2007; Giordano *et al.*, 2012), encontrando comportamentos similares a lagoa Mangueira com relação a autotrofia e heterotrofia entre essas zonas (Lauster *et al.*, 2006; Van de Bogert *et al.*, 2007).

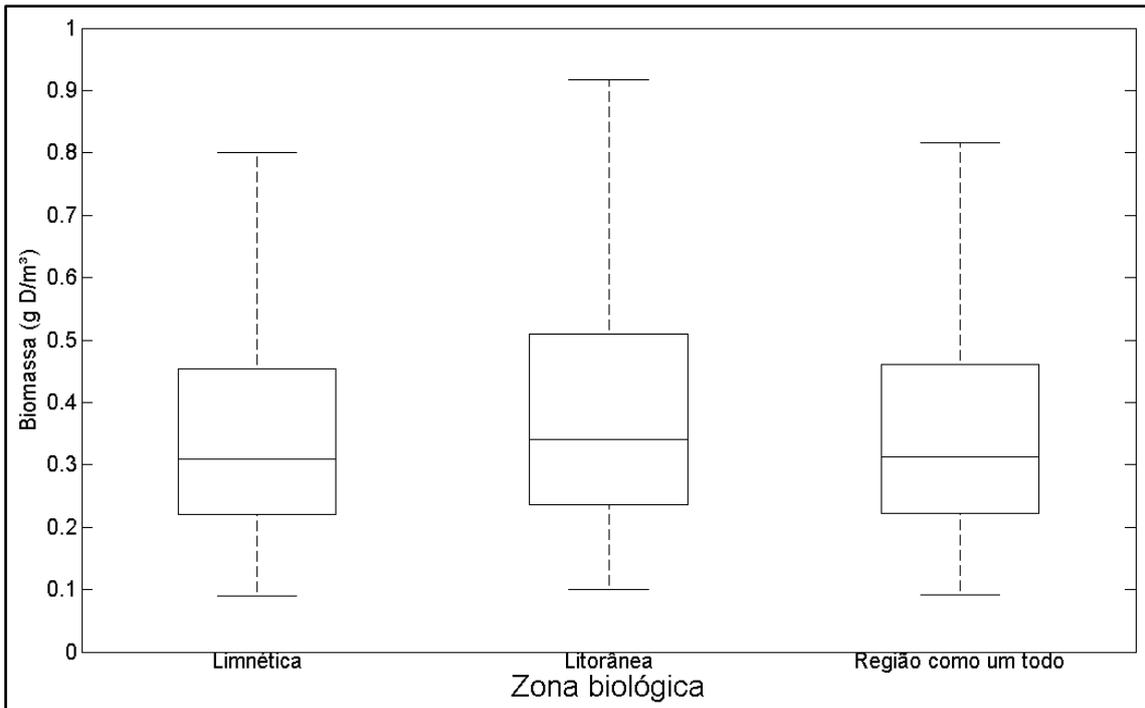


Figura 5.12 - Box-plot da biomassa de fitoplâncton entre as zonas biológicas delimitadas para a lagoa Mangureira. Cenário com vento observado.

Os resultados encontrados pela ANOVA entre as regiões e a lagoa Mangureira para GPP, R e NEP, demonstraram que existe diferença significativa entre a região Norte e todas as outras regiões (incluindo a Lagoa Mangureira como um todo) para as três variáveis. A região Central também apresentou diferença significativa com a região Sul para GPP, R e NEP. Entre a região Central e a Lagoa Mangureira como um todo, não houve diferença significativa apenas para NEP. A região Sul não apresentou diferença significativa para a Lagoa Mangureira em nenhuma das variáveis. Esta análise demonstra que a região Norte possui estimativas de metabolismo (GPP, NEP e R) diferentes das outras regiões da lagoa Mangureira. Diferentes estimativas de metabolismo dentro de um mesmo ambiente podem ocorrer (Van de Bogert *et al.*, 2012). Neste trabalho, as variações nas estimativas de GPP e R (e consequentemente NEP) encontradas entre regiões geográficas, podem ser atribuídas às variações de biomassa de fitoplâncton estimadas pelo modelo (Figura 5.13).

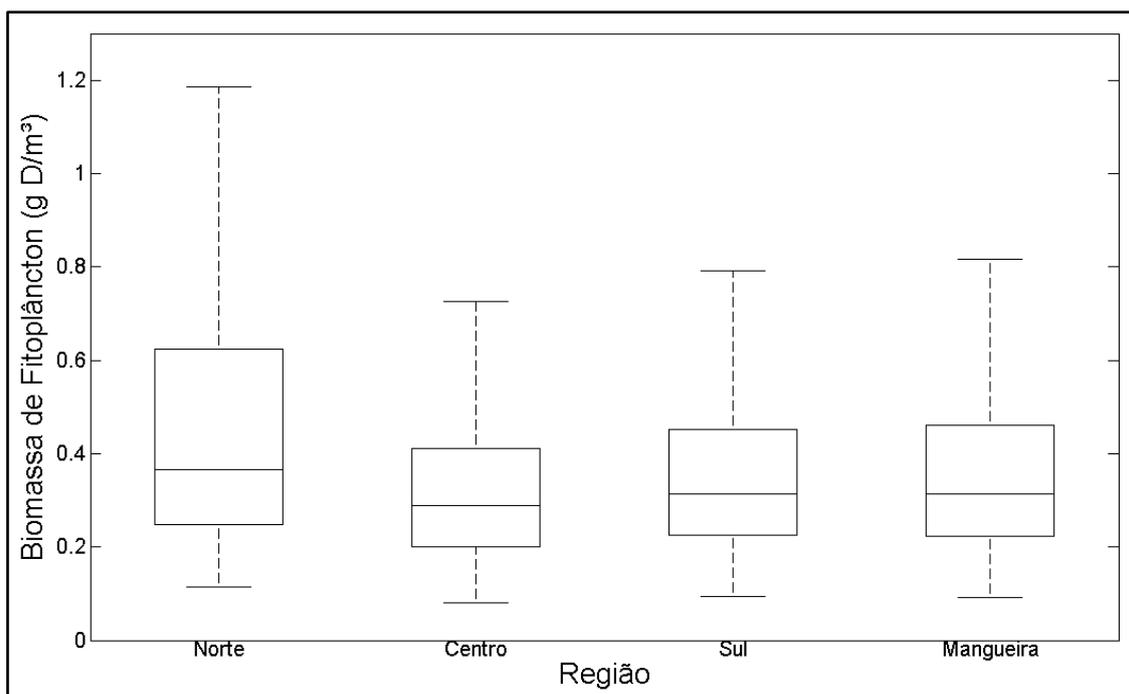


Figura 5.13 - Box-plot da biomassa de fitoplâncton entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário com vento observado.

As velocidades da água médias para cada região variaram em sentido e magnitude (Tabela 5.3). A região Norte apresentou uma velocidade média resultante um pouco maior do que as demais regiões, no sentido Norte (N) – Sul (S). A lagoa Mangueira como um todo, apresentou uma velocidade média resultante menor do que as encontradas por região, mas manteve o sentido encontrado na região Sul, Nordeste (NE) – Sudoeste (SW). A série de ventos real possui uma direção predominante (NE). O sentido da resultante encontrado para a lagoa Mangueira é o mesmo do sentido predominante na série, demonstrando a capacidade do modelo em simular com exatidão as direções predominantes de vento. Os sentidos predominantes nas regiões podem ser influenciados pela morfologia do lago e pelas correntes existentes devido a circulação hidrodinâmica interna do mesmo (Fragoso Jr. *et al.*, 2011).

Tabela 5.3 - Velocidades médias da água por região e para Lagoa Mangueira como um todo. Cenário com vento observado.

Região	Comp. X (m/s)	Comp. Y (m/s)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)	Sentido
Norte	-0,00028	-0,00038	0,00047	54	N – S
Centro	-0,00018	-0,00028	0,00031	55	N – S
Sul	-0,00031	-0,00011	0,00033	20	NE – SW
Mangueira	-0,00014	-0,00008	0,00017	29	NE – SW

5.3 Metabolismo: Comparação entre cenários de vento

5.3.1 Região Norte

As estimativas de GPP na região Norte (Figura 5.14) apresentaram variações entre os cenários de vento. Apenas o cenário com vento constante apresentou aumento no valor mediano da série.

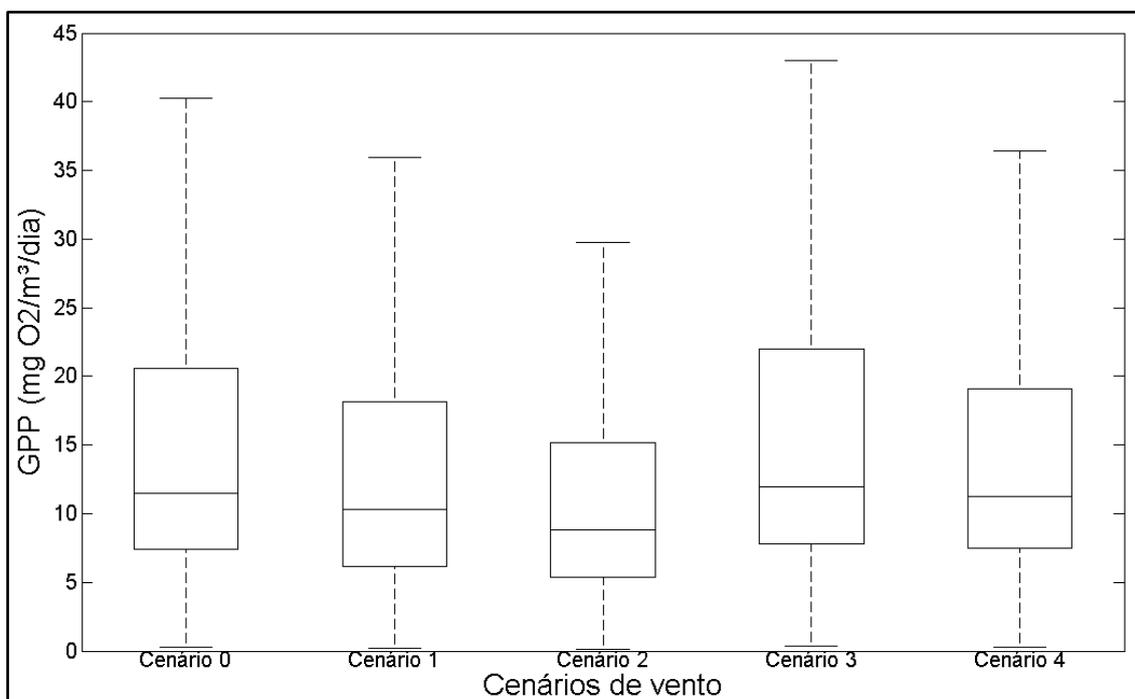


Figura 5.14 - Box-plot para GPP entre os cenários de vento na região Norte.

A diferença média nas estimativas de GPP entre o cenário com vento observado e o cenário sem vento foi de 2,48 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,001), entre o cenário com vento observado e o cenário com direções opostas foi de 3,87 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,001) e entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de 1,02 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,01). Na comparação entre esses cenários, as estimativas de GPP apresentaram uma redução em seu valor médio. Houve maior redução no valor médio no cenário com direções opostas, seguido pelo cenário sem vento e em menor proporção no cenário de vento com velocidade dobrada. Além dos valores médios, a dispersão entre valores e a amplitude interquartil apresentam menor variação. A diferença média entre o cenário com vento observado e o cenário com vento constante foi -1,16 mgO₂/m³/dia (p -value < 0,01), indicando que ocorre um aumento nos valores médios no cenário com vento constante. Além do aumento nos valores médios, os valores estimados apresentam maior

dispersão, sugerindo que esse regime de vento pode causar maiores diferenças entre as estimativas de GPP nessa região. Em todos os cenários de vento comparados, as diferenças se mostraram significativas ($p\text{-value} < 0,05$).

As estimativas de R na região Norte (Figura 5.15) também apresentaram variações entre os cenários de vento. O comportamento das estimativas entre cenários de vento foi similar ao das estimativas de GPP.

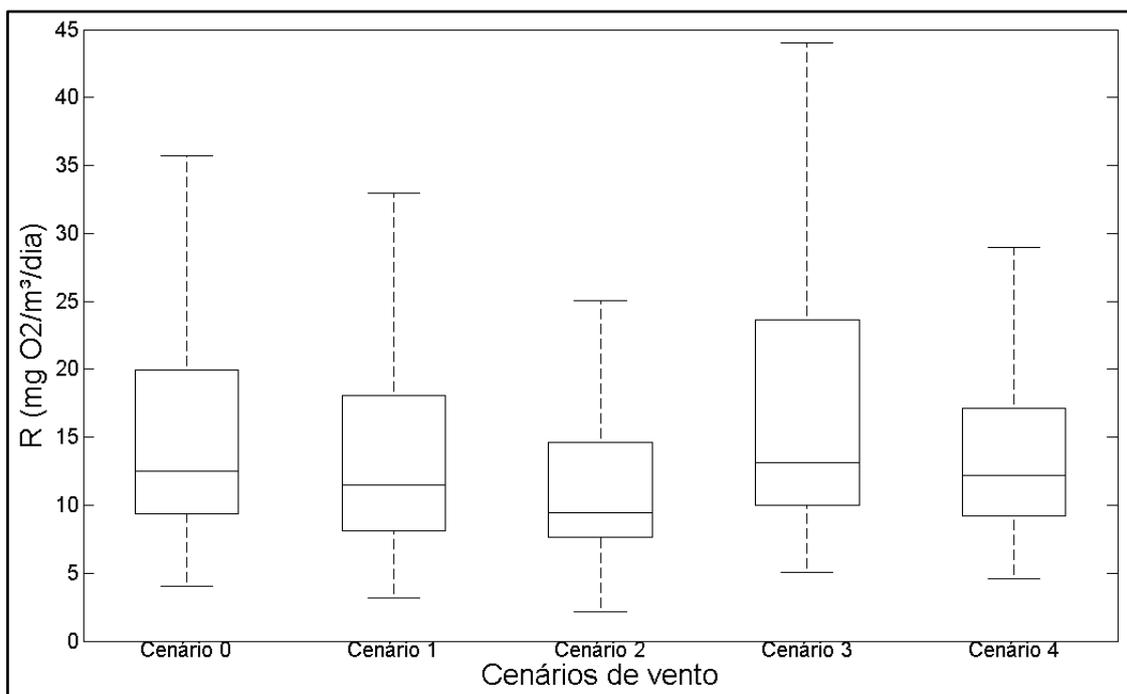


Figura 5.15 - Box-plot para R entre os cenários de vento na região Norte.

As variações nas estimativas de R para a região Norte entre os cenários de vento avaliados foram similares às variações encontradas para GPP. O comportamento entre cenários (redução na média, dispersão e amplitude interquartil) se mantiveram similares. Algumas poucas diferenças podem ser destacadas entre o R e GPP, uma delas é o fato do cenário com vento observado possuir estimativas mais próximas do cenário sem vento. Além disso, o cenário de vento com velocidade dobrada apresentou valores com dispersão menor (quando comparado ao mesmo cenário para GPP), sugerindo que a velocidade do vento pode homogeneizar as estimativas de R numa escala maior que as estimativas de GPP. A diferença média entre as estimativas de R entre o cenário com vento observado e o cenário sem vento foi de $2,02 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,001$), entre o cenário com vento observado e o cenário com direções opostas foi de $3,86 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value}$

< 0,001), entre o cenário com vento observado e o cenário de vento constante foi de $-1,22 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,001$), e entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de $1,43 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,001$). Assim como para GPP, todas as alterações entre cenários de vento nas estimativas de R foram consideradas significativas ($p\text{-value} < 0,05$).

As estimativas de NEP na região Norte (Figura 5.16) apresentaram variações entre os cenários de vento. Entretanto, a variação entre cenários foi baixa quando comparada as variações sofridas por GPP e R.

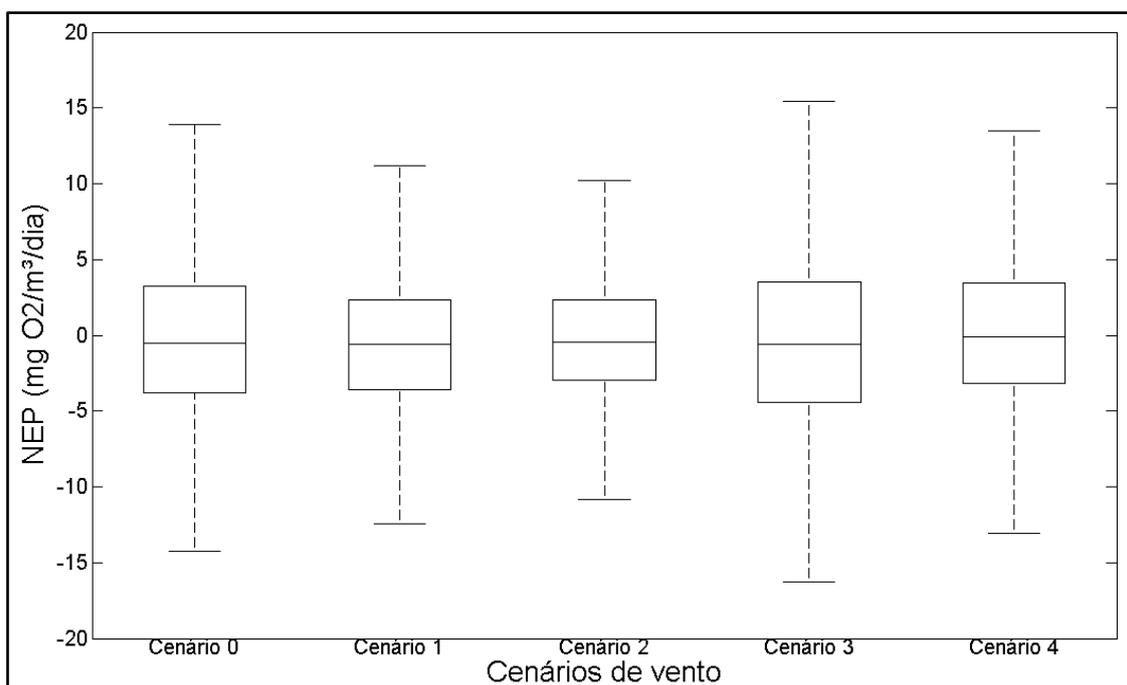


Figura 5.16 - Box-plot para NEP entre os cenários de vento na região Norte.

As variações nas estimativas de NEP entre os cenários de vento simulados foram mais estáveis que as variações nas estimativas de GPP e R. Apesar disto, o mesmo comportamento (para mediana, amplitude interquartil e dispersão entre os valores) entre cenários pôde ser observado. Ocorre redução nos valores médios e na dispersão entre os valores estimados nos cenários sem vento, cenário de vento com direções opostas e cenário de vento constante. O cenário de vento com velocidade dobrada apresentou valor médio maior que o cenário com vento observado. Apesar disto, os valores estimados neste cenário foram mais homogêneos que os estimados no cenário com vento observado. A diferença média entre o cenário com vento observado e o cenário sem vento foi de $0,46 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,05$), entre o cenário com vento

observado e o cenário de vento com direções opostas foi de $0,01 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,94$), entre o cenário com vento observado e o cenário de vento constante foi de $0,06 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,78$) e entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de $-0,40 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,05$). As diferenças médias encontradas entre os cenários foram significativas ($p\text{-value} < 0,05$) entre o cenário de vento observado e os cenários sem vento e de vento com velocidade dobrada. Nos outros casos, as diferenças nas estimativas de NEP não foram significantes.

As estimativas de metabolismo da região Norte apresentaram sensibilidade a alterações na série de vento. As séries estimadas de GPP e R apresentaram diferenças significativas ($p\text{-value} < 0,05$) em todas as comparações entre os cenários de vento simulados. As diferenças médias nos valores de NEP não foram significativas em duas comparações (entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com direções opostas e entre o cenário com vento observado e o cenário de vento constante). Alterações no regime de vento podem alterar de diferentes formas as estimativas de metabolismo. Na região Norte, foi observado um padrão em que os cenários sem vento e de vento com direções opostas tendem a reduzir os valores estimados e sua amplitude. O cenário de vento com velocidades dobradas também tende a reduzir os valores médio. Entretanto, para GPP e NEP esse cenário mantém estimativas com valores dispersos, não sendo observado este comportamento para R. De maneira geral, o cenário com vento constante apresentou as maiores variações entre os valores estimados nas três variáveis, enquanto o cenário com direções trocadas aparenta homogeneizar os valores estimados. Uma característica marcante entre os cenários é o comportamento similar entre GPP e R. O fato do NEP apresentar variações não-significantes pode ser devido à combinação das alterações nas séries de GPP e R.

As velocidades médias da água e os sentidos encontrados para as correntes hidrodinâmicas sofreram alterações em cada cenário (Tabela 5.6). Por possuir uma distribuição espacial verticalizada, o sentido médio das correntes resultante segue esta distribuição, se mantendo constante ao longo do eixo Norte-Sul. No cenário com vento constante, único onde a direção Nordeste ocorre, as correntes podem ter apresentado sentido diferente das demais devido a intensidade do vento usado na simulação ($4,65 \text{ m/s}$).

Tabela 5.4 - Velocidades média da água e sentidos predominantes para cada cenário na região Norte.

Cenário	Comp. X (m/s)	Comp. Y (m/s)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)	Sentido
Cenário 0	-0,00028	-0,00038	0,00047	54	N – S
Cenário 1	-0,0000013	-0,0000015	0,000002	49	N – S
Cenário 2	-0,000012	0,00014	0,000014	-85	S – N
Cenário 3	-0,0073	-0,0059	0,0094	39	NE – SW
Cenário 4	-0,0012	-0,0016	0,002	53	N – S

5.3.2 Região Central

As estimativas de metabolismo (GPP, R e NEP) da região Central apresentam uma variação entre cenários de vento similar a encontrada na região Norte. As variações do GPP (Figura 5.17) foram marcadas pela pouca redução na amplitude e dispersão dos resultados, diferente do observado para a região Norte.

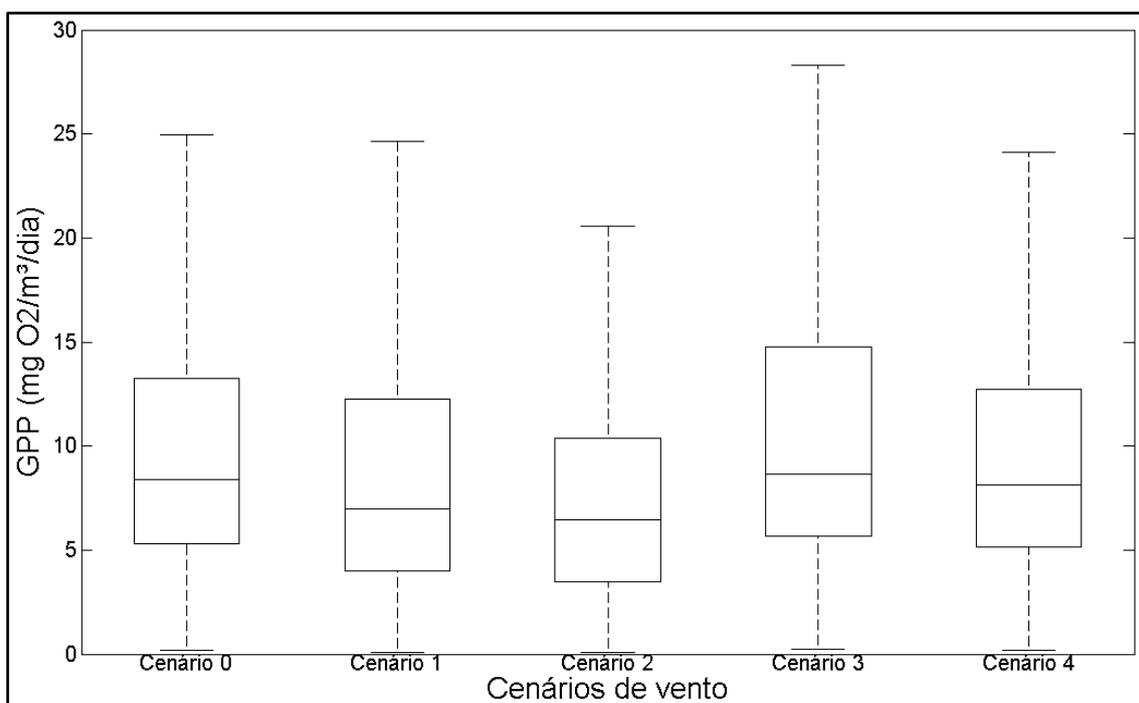


Figura 5.17 - Box-plot para GPP entre os cenários de vento na região Central.

As estimativas de GPP entre os cenários de vento simulados para a região Central apresentaram um comportamento um pouco diferente do observado para a região Norte. Na região Central, o cenário sem vento apresenta redução no valor médio, porém mantém uma dispersão nas estimativas similar ao encontrado no cenário com vento observado. O cenário com vento constante apresentou aumento no valor médio quando comparado ao cenário com vento observado, aumentando também a amplitude e a

dispersão das estimativas. O cenário com direções opostas apresentou as menores estimativas. As diferenças médias entre os cenários foram menores do que as encontradas na região Norte, tendo inclusive um dos cenários (cenário sem vento) não apresentando diferença significativa com o cenário com vento observado. A diferença entre o cenário com vento observado e o cenário sem vento foi de $0,42 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,12$), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com direções opostas foi de $1,61 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,001$), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento constante foi de $-0,81 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,01$) e entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de $0,68 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,01$). A maior diferença média entre cenários ocorreu entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com direções opostas, assim como na região Norte.

As estimativas de R na região Central (Figura 5.18) também apresentaram variações entre os cenários de vento. Destaca-se o comportamento das estimativas no cenário sem vento.

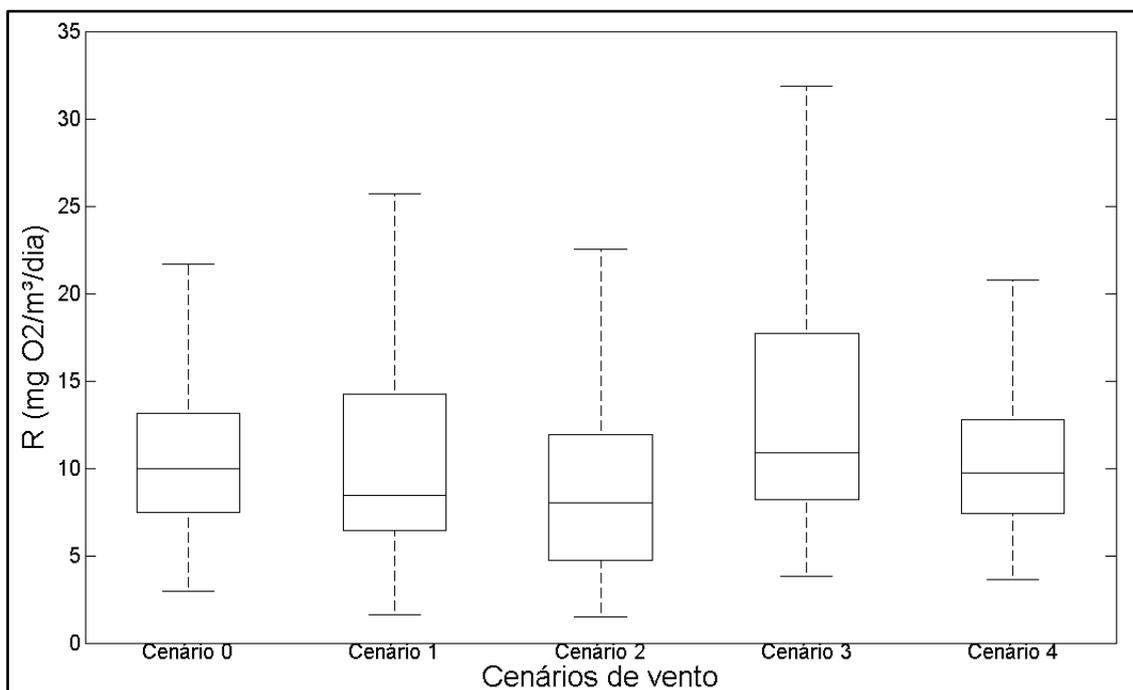


Figura 5.18 - Box-plot para R entre os cenários de vento na região Central.

As estimativas de R entre cenário de vento na região Central apresentaram um comportamento diferente do encontrado na região Norte. O cenário sem vento apresentou amplitude interquartil e dispersão nos valores

superior ao cenário com vento observado. Apesar disso, o valor médio apresentou redução, como encontrado na região Norte. Além da diferença encontrada no cenário sem vento, o cenário de vento com direções opostas apresentou comportamento diferente também. As estimativas de R no cenário de vento com direções trocadas apresentou redução no valor médio, mas um aumento na amplitude interquartil e na dispersão dos valores. Este comportamento não foi observado na região Norte. Com relação ao cenário com vento constante e ao cenário de vento com velocidade dobrada, o comportamento foi similar ao já comentado para a região Norte. As diferenças médias nas estimativas de R entre os cenários de vento apresentaram valores menores que os encontrados na região Norte. A diferença média nas estimativas de R entre o cenário com vento observado e o cenário sem vento foi de 0,42 mgO₂/m³/dia (*p-value* = 0,07), entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com direções opostas foi de 1,76 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001), entre o cenário de vento observado e o cenário com vento constante foi de -1,58 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001) e entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de 0,54 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,01). Assim como encontrado para GPP, as estimativas de R entre o cenário com vento observado e o cenário sem vento não apresentaram diferença significativa. Para os outros cenários, esta significância foi observada (*p-value* < 0,05).

As estimativas de NEP na região Central (Figura 5.19) também apresentaram variações entre os cenários de vento. Entretanto, a variação entre cenários foi baixa quando comparada as variações sofridas por GPP e R.

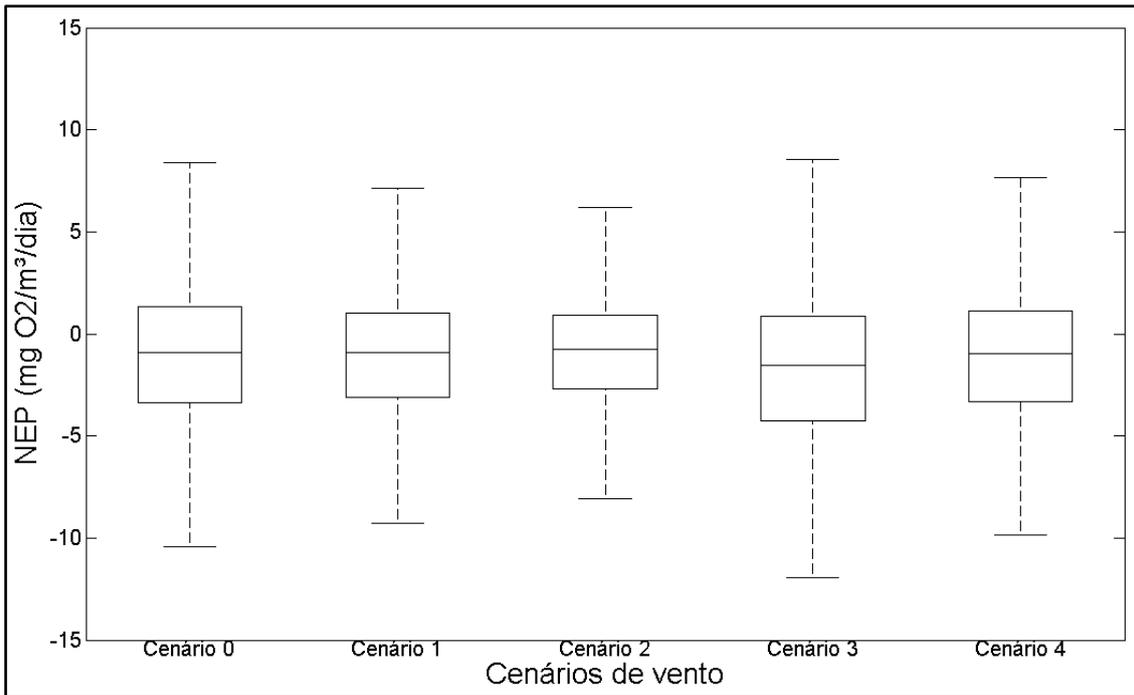


Figura 5.19 - Box-plot para NEP entre os cenários de vento na região Central.

A variação nas estimativas de NEP, entre os cenários de vento avaliados para a região Central, apresentou comportamento similar ao encontrado para as variações nas estimativas de GPP nesta região. As únicas diferenças foram observadas nos cenários de vento com direções opostas e no cenário de vento constante. Para NEP, o cenário de vento com direções opostas apresentou valor médio maior que o cenário com vento observado, o contrário acontecendo para o cenário com vento constante. Apesar disto, a amplitude e dispersão dos valores continuou similar ao observado para GPP (aumento no cenário com vento constante e redução no cenário de vento com direções opostas). A diferença média entre o cenário de vento observado e o cenário sem vento foi menor que $0,00 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,99$), entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com direções opostas foi de $-0,15 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,28$), entre o cenário com vento observado e o cenário com vento constante foi de $0,77 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,001$) e entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com velocidades dobradas de $0,14 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,31$). Na região Central, as estimativas entre os cenários de vento avaliados só apresentaram diferença significativa ($p\text{-value} < 0,05$) entre o cenário de vento observado e o cenário com vento constante.

Os resultados demonstram que as estimativas de metabolismo da região Central também são sensíveis à influência do vento. Entretanto, a escala de valores é um pouco menor quando comparada a escala de valores que variam as estimativas de metabolismo da região Norte. Na região Central, foi possível observar um cenário onde as alterações em GPP e R não foram significativas (entre o cenário com vento real e o cenário sem vento), já para NEP, três cenários apresentaram essa característica (entre o cenário com vento observado e o cenário sem vento, entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com direções opostas e entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada). Estes resultados indicam que esta região é menos sensível a alterações na série de ventos do que a região Norte, que apresentou diferença significativa em todos os cenários de vento para GPP, R e NEP. O comportamento de GPP entre os cenários de vento avaliados foi similar ao encontrado para a região Norte. O comportamento de R foi um pouco diferente, apresentando amplitude e dispersão entre os valores no cenário sem vento maiores que os observados na região Norte. Isto pode ser devido as circulações existentes por outros fatores além do vento. Fatores de menor importância para a hidrodinâmica da Lagoa Mangueira como vazões de entrada pelas bacias delimitadas ou a força de Coriolis (Fragoso Jr. *et al.*, 2011). Como a região Central possui profundidades maiores que a região Norte, a falta de mistura da água promovida pela ausência do vento pode gerar padrões de heterogeneidade espacial que intensificam a separação entre zona litorânea e zona limnética. Estas zonas possuem estimativas diferentes de metabolismo (a zona litorânea possui estimativas maiores), aumentando assim a amplitude e dispersão dos valores estimados no cenário sem vento. O comportamento do NEP entre cenários de vento foi similar ao observado na região Norte. Entretanto, na região Central o NEP apresentou diferença significativa nas estimativas apenas entre o cenário de vento observado e o cenário de vento constante.

A magnitude e o sentido da velocidade média resultante na região Central variaram em praticamente todos os cenários de vento (Tabela 5.5). Esta variação demonstra a sensibilidade da região aos padrões de circulação da lagoa. A morfologia da lagoa, seu volume de água e sua sensibilidade aos padrões de circulação, são fatores que explicam o fato dos sentidos da

velocidade resultante nos cenários 0 e 2 não serem opostas, mesmo o vento tendo direções opostas nestes cenários.

Tabela 5.5 - Velocidades médias da água e sentidos predominantes para cada cenário na região Central.

Cenário	Comp. X (m/s)	Comp. Y (m/s)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)	Sentido
Cenário 0	-0,00018	-0,00028	0,00031	55	S – N
Cenário 1	0,000026	-0,000016	0,000031	-31	NW – SE
Cenário 2	0,00063	0,000038	0,00063	3	W – E
Cenário 3	-0,0038	0,0013	0,004	-19	SE - NW
Cenário 4	0,00094	0,0015	0,0018	58	S - N

5.3.3 Região Sul

Assim como nas regiões Norte e Central, as alterações na série de vento foram capazes de causar variações nos valores estimados de GPP na região Sul (Figura 5.20).

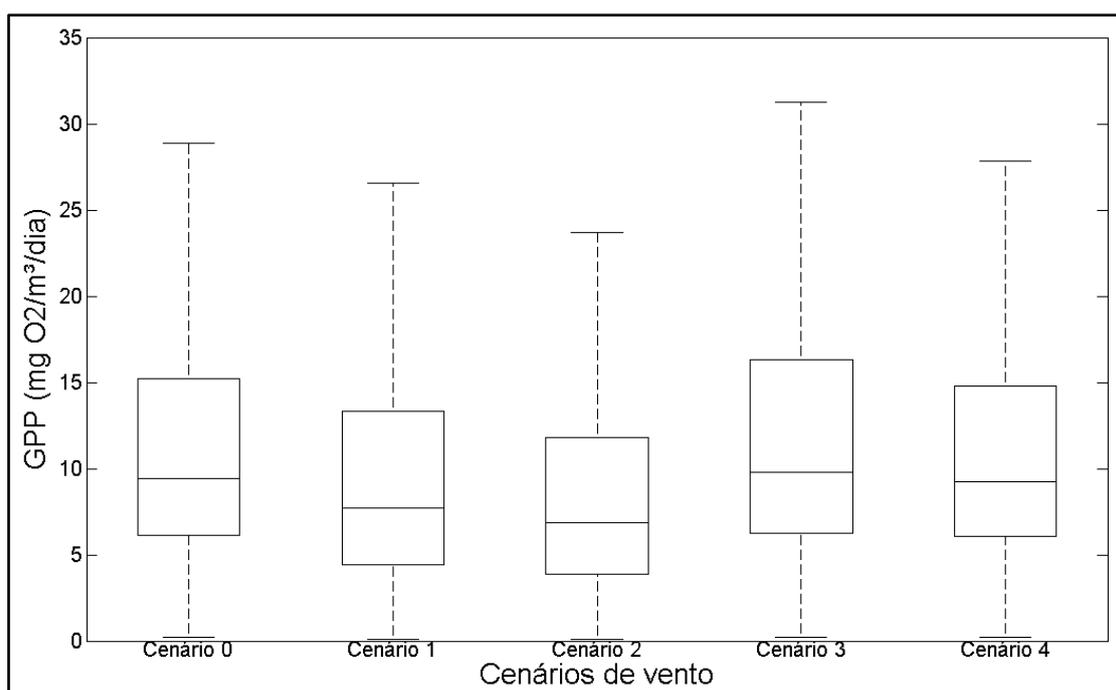


Figura 5.20 - Box-plot para GPP entre os cenários de vento na região Sul.

As estimativas de GPP entre os cenários de vento na região Sul apresentou comportamento similar às outras regiões. Assim como nas outras regiões, o cenário sem vento, o cenário de vento com direções opostas e o cenário de vento com velocidade dobrada apresentaram redução nos valores, reduzindo as médias, as amplitudes e a dispersão entre os valores. O cenário com vento constante apresentou um aumento no valor médio e na dispersão

entre valores, com um aumento menor na amplitude interquartil da distribuição. A maior diferença média foi encontrada entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com direções opostas (2,15 mgO₂/m³/dia e *p-value* < 0,001). Entre o cenário de vento observado e o cenário sem vento, a diferença média foi de 0,93 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001), entre o cenário com vento observado e o cenário com vento constante foi de -0,80 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,01) e entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de 0,42 mgO₂/m³/dia (*p-value* = 0,10). Para o GPP, a diferença média entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada não foi significativa. Apenas neste caso esse resultado foi observado, sugerindo que a região Sul pode não sofrer tanto com a influência da intensidade do vento como as outras regiões.

As estimativas de R entre os cenários de vento na região Sul (Figura 5.21) apresentaram alterações similares as encontradas na região Central.

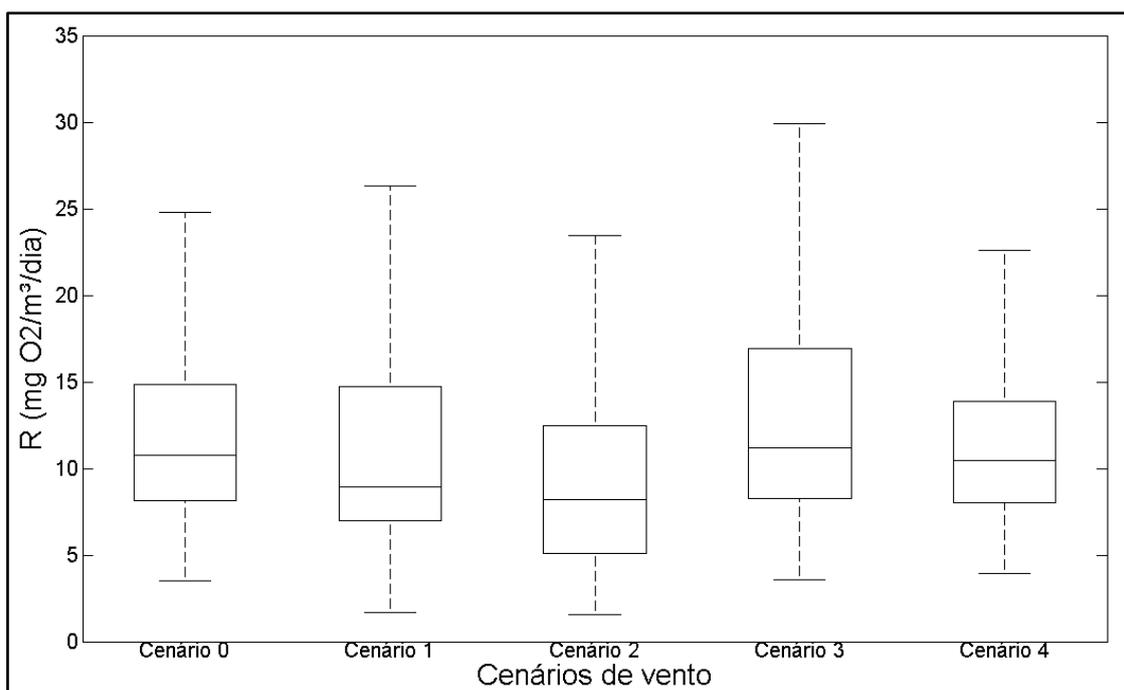


Figura 5.21 - Box-plot para R entre os cenários de vento na região Sul.

As estimativas de R entre os cenários de vento para a região Sul apresentaram comportamento similar ao encontrado na região Central. O cenário sem vento, o cenário de vento com direções opostas e o cenário de vento constante apresentaram aumento na amplitude interquartil e na dispersão entre os valores quando comparados ao cenário com vento

observado. O cenário de vento com velocidade dobrada apresentou valores mais próximos a média, com amplitude e dispersão entre os valores menores que o encontrado para o cenário com vento observado. A diferença média nos valores entre o cenário com vento observado e o cenário sem vento foi de 0,85 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001), entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com direções opostas foi de 2,20 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001), entre o cenário com vento observado e o cenário com vento constante foi de -0,83 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001) e entre o cenário com vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de 0,60 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,01). A diferença média entre os cenários foi significativa em todos os casos (*p-value* < 0,05).

As estimativas de NEP entre os cenários de vento na região Sul (Figura 5.22) apresentaram alterações similares as encontradas na região Norte e na região Central.

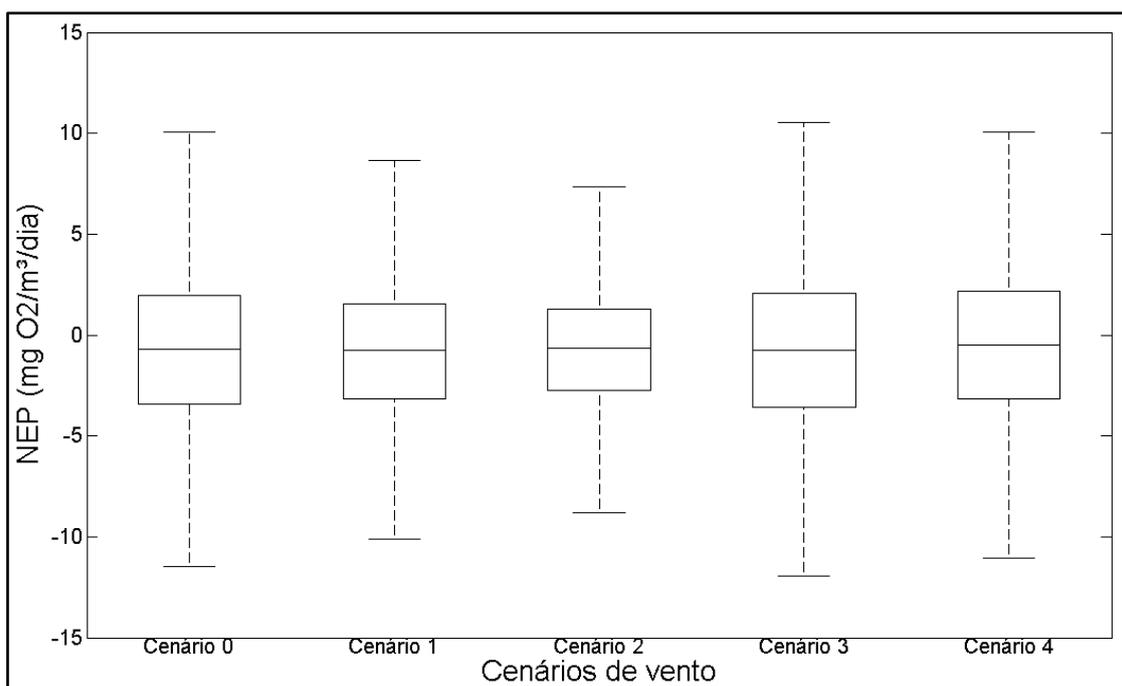


Figura 5.22 - Box-plot para NEP entre os cenários de vento na região Sul.

As estimativas de NEP entre os cenários de vento na região Sul apresentou o mesmo comportamento descrito pelas outras regiões. O cenário sem vento e o cenário de vento com direções opostas apresentaram redução na amplitude interquartil e na dispersão entre valores estimados quando comparados ao cenário com vento observado. O cenário de vento constante e o cenário de vento com velocidade dobrada apresentaram amplitude interquartil

e dispersão entre os valores estimados similar ao encontrado para o cenário com vento observado. As diferenças médias encontradas entre os cenários de vento foram pequenas quando comparadas as encontradas para GPP e R. Os cenários de vento com direções opostas e com velocidade dobrada apresentaram aumento no valor médio. O contrário sendo encontrado para os outros cenários. A diferença média entre o cenário com vento observado e o cenário sem vento foi de $0,09 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,58$), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com direções opostas foi de $-0,05 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,72$), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento constante foi de $0,03 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,83$) e entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de $-0,18 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} = 0,23$). As diferenças não apresentaram significância entre nenhum dos cenários.

As estimativas de metabolismo da região Sul apresentaram um comportamento diferente das estimativas da região Norte e Central. Nesta região, houve alterações significativas ($p\text{-value} < 0,05$) na série de R em todos os cenários, e para o GPP em apenas três cenários. O cenário com velocidade dobrada gerou alteração significativa na série de GPP e não na série de R. Isto pode ser atribuído às menores concentrações de clorofila-*a* nesta região (Fragoso Jr *et al.*, 2008; 2011). As séries de NEP também apresentaram comportamento um pouco diferente nesta região, não apresentando diferenças significantes entre os cenários avaliados. Os resultados demonstram que a região Sul possui menor sensibilidade à influência do vento quando comparada as outras regiões. A morfologia da lagoa Mangueira pode ser uma explicação para isso. A região Sul pode sofrer uma mistura mais intensa devido a presença de uma barreira natural (margem) em pelo menos três lados, o que pode causar padrões hidrodinâmicos diferentes dos encontrados na região Central. Com relação a região Norte a região Sul possui uma morfologia mais simples, o que pode gerar uma maior estabilidade nas estimativas. Ao se comparar a influência do vento entre as regiões da lagoa Mangueira, é possível observar que o vento influencia de maneira diferente cada região, sendo as estimativas de metabolismo da região Norte mais sensíveis as alterações no regime de vento que as estimativas de metabolismo das demais regiões.

A magnitude e o sentido da velocidade resultante média para a região Sul variaram entre os cenários de vento (Tabela 5.6). Apesar da variação nas velocidades não corresponde a uma variação nas proporções de metabolismo, as séries temporais indicam que a hidrodinâmica influencia as magnitudes das estimativas de metabolismo.

Tabela 5.6 - Velocidades médias da água e sentidos predominantes para cada cenário na região Sul.

Cenário	Comp. X (m/s)	Comp. Y (m/s)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)	Sentido
Cenário 0	-0,00031	-0,00011	0,00033	20	NE – SW
Cenário 1	0,000012	-0,000012	0,000017	-46	NW – SE
Cenário 2	0,0002	0,000061	0,00021	17	SW – NE
Cenário 3	-0,0047	-0,012	0,013	69	N - S
Cenário 4	-0,00085	-0,0004	0,00094	25	NE - SW

5.3.4 Lagoa Mangueira

O GPP estimado para a Lagoa Mangueira como um todo sofre alterações entre os cenários de vento avaliados (Figura 5.23). Para a lagoa como um todo, o cenário com vento observado foi responsável pela maior amplitude entre os valores estimados.

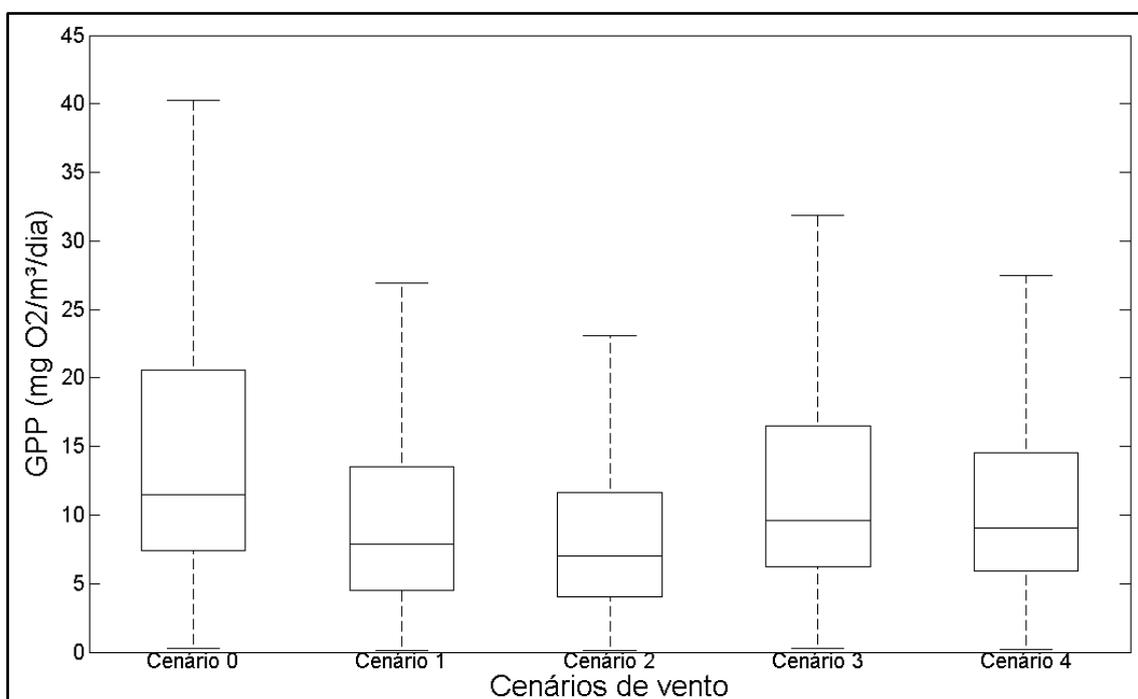


Figura 5.23 - Box-plot para GPP entre os cenários de vento na Lagoa Mangueira como um todo.

As variações de GPP para a Lagoa Mangueira como um todo apresentaram um comportamento diferente dos encontrados para as três regiões geográficas delimitadas. Neste caso, o cenário com vento observado sempre apresentou valores maiores que os outros cenários. Desta forma, também apresentou maior amplitude interquartil e maior dispersão entre os valores estimados. Apesar dessa diferença, os outros cenários se apresentaram da mesma forma encontrada de maneira geral entre regiões. Todos os cenários apresentaram menor valor médio, menor dispersão e menor amplitude interquartil quando comparados ao cenário com vento observado. A diferença média entre o cenário de vento observado e o cenário sem vento foi de 0,91 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com direções opostas foi de 2,15 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento constante foi de 0,86 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001) e entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de 0,67 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001). Todos os cenários apresentaram diferença significativa entre si (*p-value* < 0,05).

As estimativas de R entre cenários de vento (Figura 5.24) também apresentaram variações. Novamente, o comportamento do cenário de vento constante foi diferente do encontrado para as regiões geográficas.

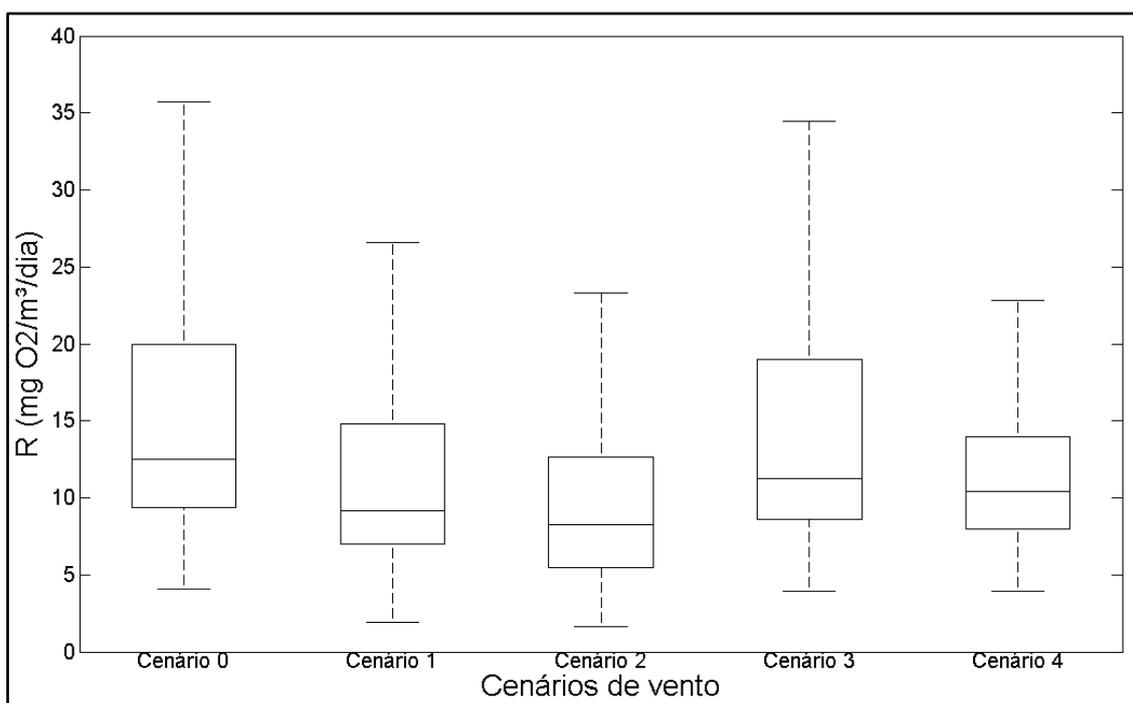


Figura 5.24 - Box-plot para R entre os cenários de vento na Lagoa Mangueira como um todo.

As estimativas de R entre os cenários de vento para a Lagoa Manguueira como um todo apresentou sensibilidade às variações nas séries vento. Houve redução nos valores médios, na amplitude interquartil e na dispersão entre as estimativas entre o cenário de vento observado e os cenários: sem vento, de vento com direções opostas e de vento com velocidade dobrada. O cenário de vento constante apresentou amplitude interquartil similar ao cenário de vento observado, porém o valor médio e a dispersão das estimativas foram menores. A diferença média entre o cenário de vento observado e o cenário sem vento foi de 0,81 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com direções opostas foi de 2,24 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento constante foi de 1,31 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001) e entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de 0,72 mgO₂/m³/dia (*p-value* < 0,001). Todas as diferenças entre cenários de vento se mostraram significantes (*p-value* < 0,05).

As estimativas de NEP entre cenários de vento para a Lagoa Manguueira como um todo (Figura 5.25) apresentou variação um pouco menor quando comparada a variação apresentada pelas estimativas de GPP e R. O mesmo comportamento que foi encontrado para as regiões geográficas delimitadas.

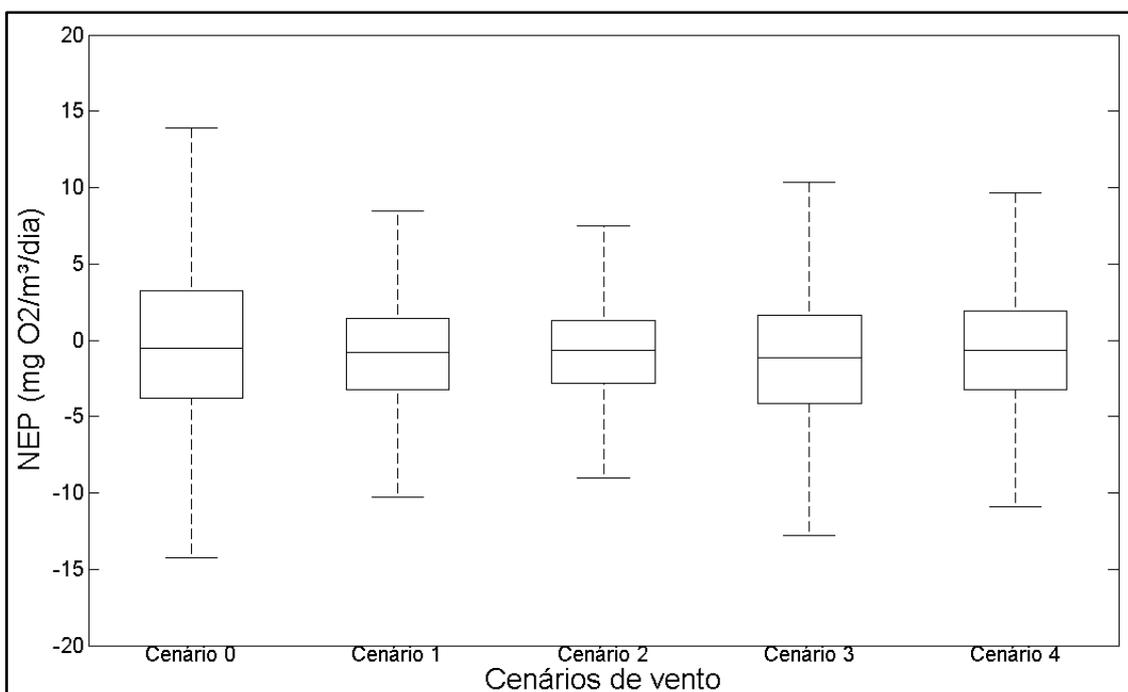


Figura 5.25 - Box-plot para NEP entre os cenários de vento na Lagoa Manguueira como um todo.

O comportamento das estimativas de NEP para a Lagoa Mangueira como um todo, entre os cenários de vento avaliados, não foi diferente do encontrado para as regiões geográficas delimitadas. Todos os cenários apresentaram redução na amplitude interquartil e na dispersão entre os valores estimados. A diferença média entre o cenário de vento observado e o cenário sem vento foi de $0,10 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,001$), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com direções opostas foi de $-0,10 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,01$), entre o cenário de vento observado e o cenário de vento constante foi de $0,45 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,001$) e entre o cenário de vento observado e o cenário de vento com velocidade dobrada foi de $-0,04 \text{ mgO}_2/\text{m}^3/\text{dia}$ ($p\text{-value} < 0,01$). Todas as diferenças foram significativas ($p\text{-value} < 0,05$).

As estimativas de metabolismo da lagoa Mangueira apresentaram um comportamento diferente dos encontrados por região. Em cada região, havia pelo menos um cenário (entre GPP, NEP e R) onde a diferença encontrada não era significativa. Para a lagoa Mangueira, isto não foi observado. Todas as comparações entre os cenários, nas três variáveis, apresentaram significância ($p\text{-value} < 0,05$). As séries de GPP, NEP e R apresentaram variações diferentes entre os cenários (quando comparado às regiões), de forma que o cenário com vento real foi o cenário onde houve a maior variação entre os valores estimados. Ainda, para R o comportamento da série no cenário com vento constante foi similar ao encontrado no cenário com vento real, o que não foi observado em nenhum outro fluxo. Diferente das regiões, a lagoa Mangueira não possui um cenário que englobe menores variações nos valores. Todos os fluxos apresentam maior variação no cenário com vento real. GPP e NEP apresentam menores variações no cenário com direções trocadas, e R apresenta menores valores no cenário com velocidade dobrada.

A magnitude da velocidade média resultante variou em todos os cenários, o mesmo não aconteceu para o sentido dessa velocidade resultante (Tabela 5.7). Por se tratar de um valor médio para toda a lagoa, a influência da morfologia da mesma não se mostra tão presente. O sentido da velocidade média resultante da lagoa corresponde ao sentido indicado pela série de vento utilizada. Entretanto, é importante ressaltar que nesse sistema de grande escala podem existir correntes hidrodinâmicas que causam mistura no

ambiente (Figura 5.26 – cenário com vento real), logo, existem regiões na lagoa onde a água pode se movimentar de forma diferente do sentido médio encontrado para cada cenário.

Tabela 5.7 - Velocidades médias da água e sentidos predominantes para cada cenário na Lagoa Mangueira como um todo.

Cenário	Comp. X (m/s)	Comp. Y (m/s)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)	Sentido
Cenário 0	-0,00014	-0,00008	0,00017	29	NE – SW
Cenário 1	0,000012	-0,00001	0,000016	-39	NW – SE
Cenário 2	0,00027	0,000079	0,00028	16	SW – NE
Cenário 3	-0,0053	-0,0059	0,0079	48	NE - SW
Cenário 4	-0,00039	-0,00017	0,00042	24	NE - SW

Cada região da lagoa se comportou de forma diferente da lagoa como um todo, demonstrando que o vento influencia as estimativas de metabolismo de cada região, e da lagoa em si. A escala espacial avaliada também se mostra importante, uma vez que o enfoque em regiões isoladas pode gerar conclusões um pouco diferentes das geradas quando se avalia a lagoa como um todo. A intensidade do vento pouco influencia as estimativas de metabolismo. Como a lagoa Mangueira é um lago raso, esse resultado era esperado. Em lagos profundos, existe estratificação nas estimativas de metabolismo ao longo da coluna d'água (e.g. Coloso *et al.*, 2008; Sadro *et al.*, 2011b), sendo possível que a intensidade do vento influencia as estimativas nestes casos.

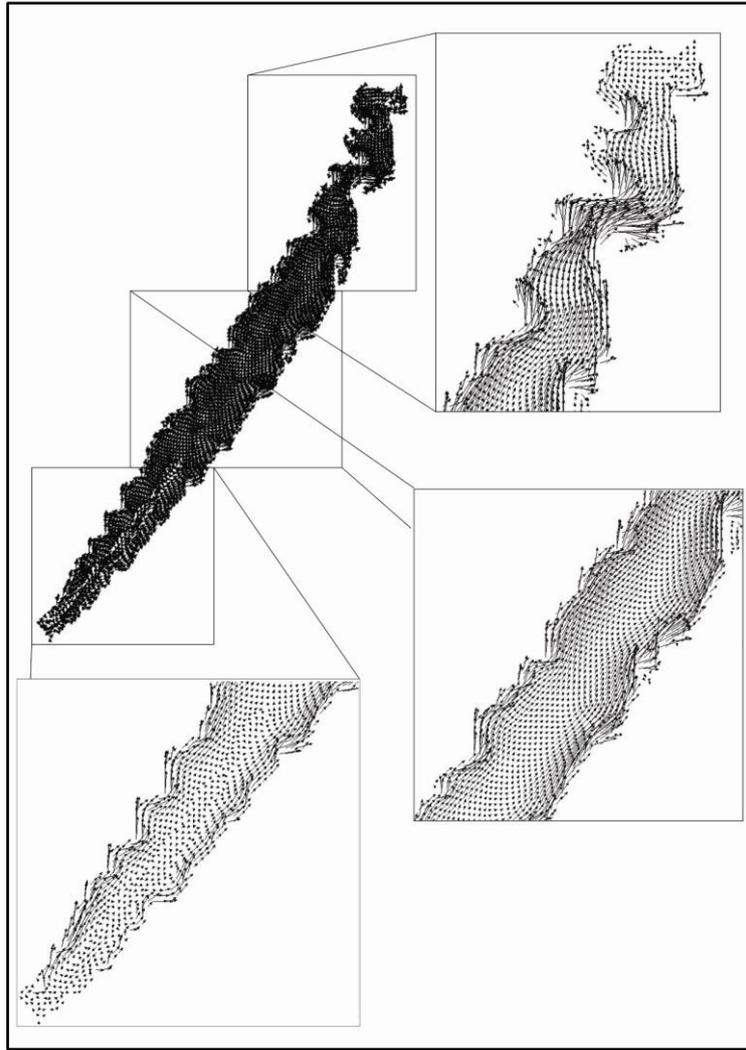


Figura 5.26 - Padrões de circulação na lagoa Mangueira e regiões. Cenário com vento observado, dia 05/01/2001 às 12:00 hrs.

6 CONCLUSÕES

A hidrodinâmica na Lagoa Mangueira influencia o seu metabolismo (GPP, R e NEP). As diferentes regiões da lagoa se mostraram bastante variáveis, tanto entre si quanto entre as zonas biológicas que as compõem. As estimativas de GPP, R e NEP também apresentaram uma sazonalidade característica, variando entre valores maiores no verão e valores menores no inverno.

A distribuição espacial do metabolismo foi caracterizada por um gradiente decrescente no sentido da região Norte para a região Sul. A região Norte pode ser considerada como outro ambiente dentro da lagoa, uma vez que suas estimativas de metabolismo e sua reação nos diferentes cenários de vento foram diferentes das demais regiões e da lagoa Mangueira como um todo. Cada região apresenta ainda diferenças entre zona litorânea e zona limnética. Apesar de possuir estimativas mais elevadas do que a zona limnética, a zona litorânea possui menor volume de água. A zona limnética possui estimativas mais próximas da região como um todo, assim como a região Sul possui as estimativas de metabolismo mais próximas ao encontrado para a lagoa Mangueira como um todo.

A velocidade da água (sentido e magnitude) média nas regiões acompanhou as alterações nas direções do vento entre os cenários. A região Sul se mostrou menos sensível a essas alterações no regime de vento do que as outras regiões, isto pode ser atribuído à morfologia da lagoa.

As estimativas de metabolismo se mostraram variáveis entre os cenários de vento considerando todas as regiões da lagoa Mangueira. Isto demonstra que a influência da hidrodinâmica derivada do vento nas estimativas de metabolismo nesta lagoa. A comparação entre cenários mostrou que a região Norte é mais sensível ao vento em relação às outras regiões. A região Central, a região Sul e a lagoa Mangueira como um todo também apresentaram variações em suas séries temporais de metabolismo, porém os valores variaram em menor escala quando comparados as variações nas estimativas encontradas na região Norte.

O processo mais importante para o balanço de oxigênio na lagoa foi a taxa de reaeração. Para o metabolismo os processos mais importantes foram a produção e o consumo de oxigênio do fitoplâncton.

A abordagem baseada em processos possibilitou a quantificação e visualização dos fluxos componentes do balanço de oxigênio e do metabolismo da lagoa Mangueira. Esta abordagem permite avaliar quais compartimentos biológicos podem controlar as estimativas de metabolismo (algas, macrófitas, bactérias, etc), assim como quais fluxos seriam mais importantes para o balanço de oxigênio em lagos e a influência de “*agentes controladores*” como a hidrodinâmica. Outra característica dessa metodologia é a capacidade de avaliar o ecossistema aquático e não apenas pontos localizados no espaço de maneira integrada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antenucci, J.P.; Tan, K.M.; Eikaas, H.S.; Imberger, J. The importance of transport processes and spatial gradients on in situ estimates of lake metabolism. *Hydrobiologia*, DOI: 10,1007/s10750-012-1212-z, 2012.
- Barko, J.W.; Murphy, P.G.; Wetzel, R.L. An investigation of primary production and ecosystem metabolism in a lake Michigan dune pond. *Archiv für Hydrobiologie*, 2: 155-187, 1977.
- Brugnach, M. Process level sensitivity analysis for complex ecological models. *Ecological Modelling*, 187: 99-120, 2005.
- Cardoso, L.S.; Fragoso Jr., C.R.; Souza, R.S.; Marques, D.M. Hydrodynamic control of plankton spatial and temporal heterogeneity in subtropical shallow lakes. In: *Hydrodynamics – Natural Water Bodies*, ed. Schulz, H. (InTech). ISBN: 978-953-307-893-9. 2012.
- Cardoso, L.S.; Motta-Marques, D.M.L. Hydrodynamic-driven plankton community in a shallow lake. *Aquatic Ecology*, 43: 73-84, 2009.
- Cardoso, L.S.; Motta-Marques, D.M.L. Rate of change of the phytoplankton community in Itapeva Lake (north coast of Rio Grande do Sul, Brazil), based on the wind driven hydrodynamic regime. *Hydrobiologia*, 497: 1-12, 2003.
- Cardoso, L.S.; Motta-Marques, D.M.L. Seasonal composition of the phytoplankton community in Itapeva Lake (north coast of Rio Grande do Sul - Brazil) in function of hydrodynamic aspects. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 16: 401-416, 2004a.
- Cardoso, L.S.; Motta-Marques, D.M.L. Structure of the zooplankton community in subtropical shallow lake (Itapeva Lake – South of Brazil) and its relationship to hydrodynamic aspects. *Hydrobiologia*, 518, 123-134, 2004b.
- Cardoso, L.S.; Motta-Marques, D.M.L. The influence of hydrodynamics on the spatial and temporal variation of phytoplankton pigments in a large, subtropical coastal lake (Brazil). *Arquivos de Biologia e Tecnologia*, 47: 587-600, 2004c.

- Cardoso, L.S.; Silveira, A.L.L.; Motta-Marques, D.M.L. A ação do vento como gestor da hidrodinâmica na lagoa Itapeva (litoral norte do Rio Grande do Sul - Brasil). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8: 5-15, 2003.
- Carignan, R. Automated determination of carbon dioxide oxygen, and nitrogen partial pressures in surface waters. *Limnology and Oceanography*, 43: 753-762, 1998.
- Carrick, H.J.; Aldridge, F.J.; Schelske, C.L. Wind influences phytoplankton biomass and composition in a shallow, productive lake. *Limnology and Oceanography*, 38: 1179-1192, 1993.
- Casulli, V. Semi-implicit Finite Difference Methods for the Two-Dimensional Shallow Water Equations. *Journal of Computational Physics*, Volume. 86, p. 56-74, 1990,
- Chen, C.C.; Petersen, J.E.; Kemp, W.M. Nutrient uptake in experimental estuarine ecosystems: scaling and partitioning rates. *Marine Ecology Progress Series*, 200: 103-116, 2000,
- Cheng, R.T.; Casulli, V.; Gartner, J.W. Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) Model and its Applications to San Francisco Bay, California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume. 36, p. 235-280, 1993.
- Cole, J.J.; Pace, M.L.; Carpenter, S.R.; Kitchell, J.F. Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations. *Limnology and Oceanography*, 45(8): 1718-1739, 2000,
- Coloso, J. J.; Cole, J. J.; Hanson, P. C.; Pace, M. L. Depth-integrated, continuous estimates of metabolism in a clear-water lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65: 1-11, 2008.
- Coloso, J. J.; Cole, J. J.; Pace, M. L. Difficulty in discerning drivers of lakes ecosystem metabolism with high-frequency data. *Ecosystems*, 14: 935-948, 2011b.
- Coloso, J. J.; Cole, J. J.; Pace, M. L. Short-term variation in thermal stratification complicates estimation of lake metabolism. *Aquatic Sciences*, 73: 305-315, 2011.
- Crossetti, L.O.; Becker, V.; Cardoso, L.S.; Rodrigues, L.R.; Costa, L.S.; Motta-Marques, D. Is phytoplankton functional classification a suitable to investigate spatial heterogeneity in a subtropical shallow lake? *Limnológica* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.limno.2012.08.010>.

- Fragoso Jr., C. R.; Ferreira, T. F.; Marques, D. M. *Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos*. Oficina de textos, 2009.
- Fragoso Jr., C.R.; Motta-Marques, D.M.L.; Collischonn, W.; Tucci, C.E.M.; Nes, E.H.V. Modelling spatial heterogeneity of phytoplankton in Lake Mangueira, a large shallow lake in south Brazil. *Ecological Modelling*, 219: 125-137, 2008.
- Fragoso Jr., C.R.; Van Nes, E.H.; Janse, J.H.; Marques, D.M. IPH-TRIM3D-PCLake: A three-dimensional complex dynamic model for subtropical aquatic ecosystems. *Environmental Modelling & Software*, 24: 1347-1348, 2009b.
- Fragoso, Jr.; C.R.; Motta-Marques, D.M.L.; Ferreira, T.F.; Janse, J.H.; Nes, E.H.V. Potential effects of climate changes and eutrophication on a large subtropical shallow lake. *Environmental Modelling & Software*, 26: 1337-1348, 2011.
- Gaarder, T.; Gran, H.H. Investigations of the production of plankton in the Oslo Fjord. *Rapp Et Proc Verg Cons Int Explor Mer*, 42: 1-48, 1927.
- Gazeau, F.; Borges, A.V.; Barron, C.; Duarte, C.M.; Iversen, N.; Middelburg, J.J.; Delille, B.; Pizay, M.D.; Frankignoulle, M.; Gattuso, J.P. Net ecosystem metabolism in a micro-tidal estuary (Randers Fjord, Denmark): evaluation of methods. *Marine Ecology Progress Series*, 301: 23-41, 2005.
- Gerhart, D.Z.; Likens, G.E. Enrichment experiments for determining nutrient limitation: 4 methods compared. *Limnology and Oceanography*, 20: 649-653, 1975.
- Giordano, J.C.P.; Brush, M.J.; Anderson, I.C. Ecosystem metabolism in shallow coastal lagoons: patterns and partitioning of planktonic, benthic, and integrated community rates. *Marine Ecology Progress Series*, 458: 21-38, 2012.
- Hanson, P. C.; Bade, D. L.; Carpenter, S. R.; Kratz T. K. Lake metabolism: Relationships with dissolved organic carbon and phosphorus. *Limnology and Oceanography*, 48(3): 1112-1119, 2003.
- Hanson, P.C.; Carpenter, S.R.; Armstrong, D.E.; Stanley, E.H.; Kratz, T.T. Lake dissolved inorganic carbon and dissolved oxygen: changing drivers from days to decades. *Ecological Monographs*, 76(3): 343-363, 2006.

- Hanson, P.C.; Carpenter, S.R.; Kimura, N.; Wu, C.; Cornelius, S.P.; Kratz, T.K. Evaluation of metabolism models for free-water dissolved oxygen methods in lakes. *Limnology and Oceanography: Methods*, 6: 454-465, 2008.
- Hayes, J.W.; Hughes, N.F.; Kelly, L.H. Process-based modelling of invertebrate drift transport, net energy intake and reach carrying capacity for drift-feeding salmonids. *Ecological Modelling*, 207: 171-188, 2007.
- Holtgrieve, G.W.; Schindler, D.E.; Branch, T.A.; A'mar, T. Simultaneous quantification of aquatic ecosystem metabolism and reaeration using a Bayesian statistical model of oxygen dynamics. *Limnology and Oceanography*, 55(3): 1047-1063, 2010,
- Huston, M.A.; Wolverton, S. The global distribution of net primary production: resolving the paradox. *Ecological Monographs*, 79(3): 343-377, 2009.
- Janse, J. H. *Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches*. Wageningen University. Wageningen, 376 pp, 2005.
- Ji, Z.-G. *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. John Wiley & Sons, 2008.
- Jorgensen, S.E. Introduction: sub-disciplines of ecology and the history of ecological modelling. In: Jorgensen, S.E.; Chon, T-S.; Recknagel, F. *Handbook of ecological modelling and informatics*, cap. 1. WIT Press, 2009.
- Jorgensen, S.E.; Fath, B.D. *Fundamentals of ecological modelling: applications in environmental management and research*. 4^a ed. Elsevier B.V. 2011.
- Kemp, W.M.; Smith, E.M.; Marvin-Dipasquale, M.; Boynton, W.R. Organic carbon balance and net ecosystem metabolism in Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 150: 229-248, 1997.
- Kemp, W.M.; Testa, J.M. Metabolic balance between ecosystem production and consumption, 2011. In: Wolanski, E.; McLuski, D. (eds), *Treatise on estuarine and coastal science*, vol 7, cap 6. Elsevier Ltd., Oxford (in press).
- Langdon, C. Dissolved oxygen monitoring system using a pulsed electrode: design, performance, and evaluation. *Deep-Sea Research*, 31: 1357-1367, 1984.

- Lauster, G.H.; Hanson, P.C.; Kratz, T.T. Gross primary production and Respiration differences among littoral and pelagic habitats in northern Wisconsin lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63: 1130-1141, 2006.
- Marcinkevage, A.C.; Herricks, E.H. A process-based ecological model for river network management. ASCE. *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress*. DOI: [http://dx.doi.org/10,1061/40792](http://dx.doi.org/10.1061/40792), 2005.
- Marotta, H.; Duarte, C.M.; Pinho, L.; Enrich-Prast, A. Rainfall leads to increased $p\text{CO}_2$ in Brazilian coastal lakes. *Biogeoscience*, 7: 1607-1614, 2010,
- Marotta, H.; Paiva, L.T.; Petrucio, M.M. Changes in thermal and oxygen stratification pattern coupled to CO_2 outgassing persistence in two oligotrophic shallow lakes of the Atlantic Tropical Forest, Southeast, Brazil. *Limnology*, 10: 195-202, 2009.
- Morin, X.; Thuiller, W. Comparing niche- and process-based models to reduce prediction uncertainty in species range shifts under climate change. *Ecology*, 90(5), 1301-1313, 2009.
- Mulholland, P.J.; Fellows, C. S.; Tank, J. L.; Grimm, N. B.; Webster, J. R.; Hamilton, S. K.; Martí, E.; Ashkenas, L.; Bowden, W. B.; Dodds, W. K.; McDowell, W. H.; Paul, M. J.; Peterson, B. J. Inter-biome comparison of factors controlling stream metabolism. *Freshwater biology*, 46: 1503-1517, 2001.
- Naiman, R.J.; Bechtold, J.S.; Beechie, T.J.; Latterell, J.J.; Pelt, R.V. A process-based view of floodplain forest patterns in coastal river valleys of the Pacific Northwest. *Ecosystems*, 13: 1-31, 2010,
- Nightingale, J.M.; Fan, W.; Coops, N.C.; Waring, R.H. Predicting tree diversity across the United States as a function of modeled gross primary production. *Ecological Applications*, 18(1): 93-103, 2008.
- Odum, H. T. Primary production in flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 1: 102-117, 1956.
- Pacanowski, R.C.; Philander, S.G.H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of Tropical Oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 11: 1443-1451, 1981.

- Paz, A. R. *Análise dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim (RS)*. Porto Alegre-RS. IPH/UFRGS. 155 p. Tese (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- Penman, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Série A*, 193: 120-145, 1948.
- Petersen, J.E.; Chen, C.C.; Kemp, W.M. Scaling aquatic primary productivity: experiments under nutrient-and light-limited conditions. *Ecology*, 78: 2326-2338, 1997.
- Petersen, J.E.; Cornwell, J.C.; Kemp, W.M. Implicit scaling in the design of experimental aquatic ecosystems. *Oikos*, 85: 3-18, 1999.
- Pierson, F.B.; Carlson, D.H.; Spaeth, K.E. A process-based hydrology submodel dynamically linked to the plant component of the simulation of production utilization on rangelands SPUR model. *Ecological Modelling*, 141: 241-260, 2001.
- Roland, F.; Vidal, L.O.; Pacheco, F.S.; Barros, N.O.; Assireu, A.; Ometto, J.P.H.B.; Cimleris, A.C.P.; Cole, J.J. Variability of carbon dioxide flux from tropical (cerrado) hydroelectric reservoirs. *Aquatic Science*, 72: 283-293, 2010,
- Sadro, S.; Melack, J.M.; MacIntyre, S. Spatial and temporal variability in the ecosystem metabolism of a high-elevation lake: integrating benthic and pelagic habitats. *Ecosystems*, 14(7): 1123-1140, 2011.
- Sadro, S.; Melack, J.M.; MacIntyre, S. Depth-integrated estimates of ecosystem metabolism in a high-elevation lake (Emerald Lake, Sierra Nevada, California). *Limnology and Oceanography*, 56 (5): 1764-1780, 2011b.
- Sand-Jensen, K.; Staehr, P.A. Net heterotrophy in small Danish lakes: a widespread feature over gradients in trophic status and land cover. *Ecosystems*, 12: 336-348, 2009.
- Sand-Jensen, K.; Staehr, P.A. Scaling of pelagic metabolism to size, trophy and forest cover in small Danish lakes. *Ecosystems*, 10: 127-141, 2007.
- Scheffer, M. *Ecology of shallow lakes. Population and community biology*. Chapman and Hall, 1998.

- Seeliger, U.; Cordazzo, C.; Barbosa, F. *Os sites e o programa brasileiro de pesquisas ecológicas de longa duração*. Belo Horizonte, FURGS/UFMG. 187 p, 2002.
- Shen, W.; Wu, J.; Grimm, N.B.; Hope, D. Effects of urbanization-induced environmental changes on ecosystem functioning in the phoenix metropolitan region, USA. *Ecosystems*, 11: 138-155, 2008.
- Siehoff, S.; Lennartz, G.; Heilburg, I.C.; Rob-Nickoll, M.; Ratte, H.R.; Preuss, T.G. Process-based modeling of grassland dynamics built on ecological indicator values for land use. *Ecological Modelling*, 222: 3854-3868, 2011.
- Sitch, S.; McGuire, A.D.; Kimball, J.; Gedney, N.; Gamon, J.; Engstrom, R.; Wolf, A.; Zhuang, Q.; Clein, J.; McDonald, K.C. Assessing the carbon balance of circumpolar arctic tundra using remote sensing and process modeling. *Ecological Applications*, 17(1): 213-234, 2007.
- Soetaert, K.; Herman, P.M.J. *A practical guide to ecological modeling*. Springer Science and Business Media B.V. 2009.
- Staeher, P. A.; Sand-Jensen, K. Temporal dynamics and regulation of lake metabolism. *Limnology and Oceanography*, 52 (1): 108-120, 2007.
- Staeher, P.A.; Baastrup-Spohr, L.; Sand-Jensen, K.; Stedmon, C. Lake metabolism scales with lake morphometry and catchment conditions. *Aquatic Sciences*, 74: 155-169, 2012b.
- Staeher, P.A.; Bade, D.; Van de Bogert, M.C.; Koch, G.R.; Williamson, C.; Hanson, P.; Cole, J.J.; Kratz, T. Lake metabolism and the diel oxygen technique: State of the science. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8: 628-644, 2010b.
- Staeher, P.A.; Sand-Jensen, K.; Raun, A.L.; Nilsson, B.; Kidmose, J. Drivers of metabolism and net heterotrophy in contrasting lakes. *Limnology and Oceanography*, 55(2): 817-830, 2010,
- Staeher, P.A.; Testa, J.M.; Kemp, W.M.; Cole, J.J.; Sand-Jensen, K.; Smith, S.V. The metabolism of aquatic ecosystems: history, applications, and future challenges. *Aquatic Sciences*, 74: 15-29, 2012.
- They, N.H.; Marques, D.M.; Souza, R.S. Lower Respiration in the littoral zone of a subtropical shallow lake. *Frontiers in Microbiology*, 3 (2), 1-10, 2013.

- Tonetta, D. *Produção primária e Respiração pelágica em um lago costeiro subtropical (lagoa do Peri, Brasil): variações vertical e temporal e suas relações com a comunidade fitoplanctônica*. Florianópolis-SC. UFSC. 86 p. Tese (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- Tsai, J.W.; Kratz, T.K.; Hanson, P.C.; Kimura, N.; Liu, W.C.; Lin, F.P.; Chou, H.M.; Wu, J.T.; Chiu, C.Y. Metabolic changes and the resistance and resilience of a subtropical heterotrophic lake to typhoon disturbance. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 68: 768-780, 2011.
- Tsai, J.W.; Kratz, T.K.; Hanson, P.C.; Wu, J.T.; Chang, W.Y.B.; Arzberger, P.W.; Lin, B.S.; Lin, F.P.; Chou, H.M.; Chiu, C.Y. Seasonal dynamics, typhoons and the regulation of lake metabolism in a subtropical humic lake. *Freshwater Biology*, 53: 1929-1941, 2008.
- Tucci, C. E. M. (org.) *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2ª Edição, Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ABRH. 2001.
- Uehlinger, U.; Naegeli, M.W. Ecosystem metabolism, disturbance, and stability in a prealpine gravel bed river. *Journal of North American Benthological Society*, 17: 165-178, 1998.
- Vadeboncoeur, Y.; Peterson, G.; Vander Zanden, M.J.; Kalff, J. Benthic algal production across lake size gradients: interactions among morphometry, nutrients, and light. *Ecology*, 89: 2542-2552, 2008.
- Vadeboncoeur, Y.; Vander Zanden, M.J.; Lodge, D.M. Putting the lake together: reintegrating benthic pathways into lake food web models. *Bioscience*, 52: 44-54, 2002.
- Van de Bogert, M. C.; Carpenter, S. R.; Cole, J. J.; Pace, M. L. Assessing pelagic and benthic metabolism using free water measurements. *Limnology and Oceanography: Methods*, 5: 145-155, 2007.
- Villanueva, A.O.N. *Simulação de áreas de inundação dinâmicas: canais compostos e wetlands*. Porto Alegre-RS. IPH/UFRGS. 125p. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.
- Whigham, P.A.; Recknagel, F. Predicting chlorophyll-*a* in freshwater lakes by hybridizing process-based models and genetic algorithms. *Ecological Modelling*, 146: 243-251, 2001.

Xing, Z.; Bourque, C.P.-A.; Meng, F.-R.; Cox, R.M.; Swift, D.E.; Zha, T.; Chow, L. A process-based model designed for filling of large data gaps in tower-based measurements of net ecosystem productivity. *Ecological Modelling*, 213: 165-179, 2008.

8 ANEXO

8.1 Estimativas de metabolismo: regiões geográficas

8.1.1 Região Norte

As estimativas de metabolismo na região Norte (Figura 8.1) apresentaram o mesmo comportamento sazonal encontrado para a Lagoa Mangueira como um todo. O gradiente decrescente entre a zona litorânea e a zona limnética também foi observado para GPP (Figura 8.2), NEP (Figura 8.3) e R (Figura 8.4).

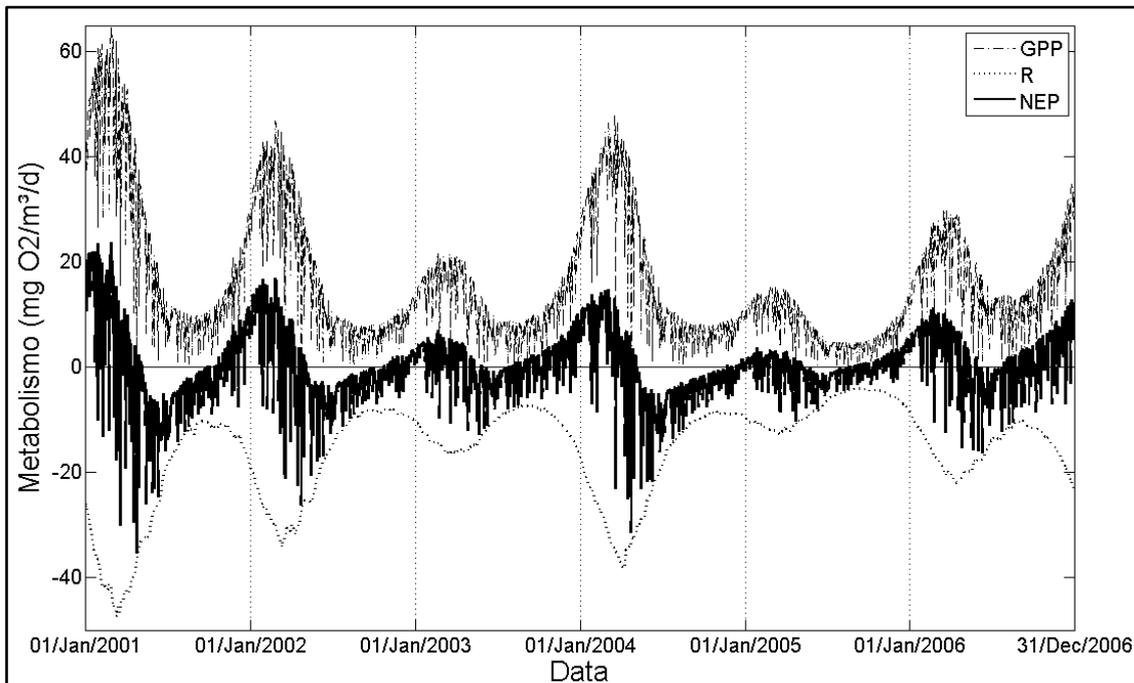


Figura 8.1- Estimativa de metabolismo para a região Norte da Lagoa Mangueira no cenário com vento observado. Uma linha contínua marca o eixo onde GPP=R.

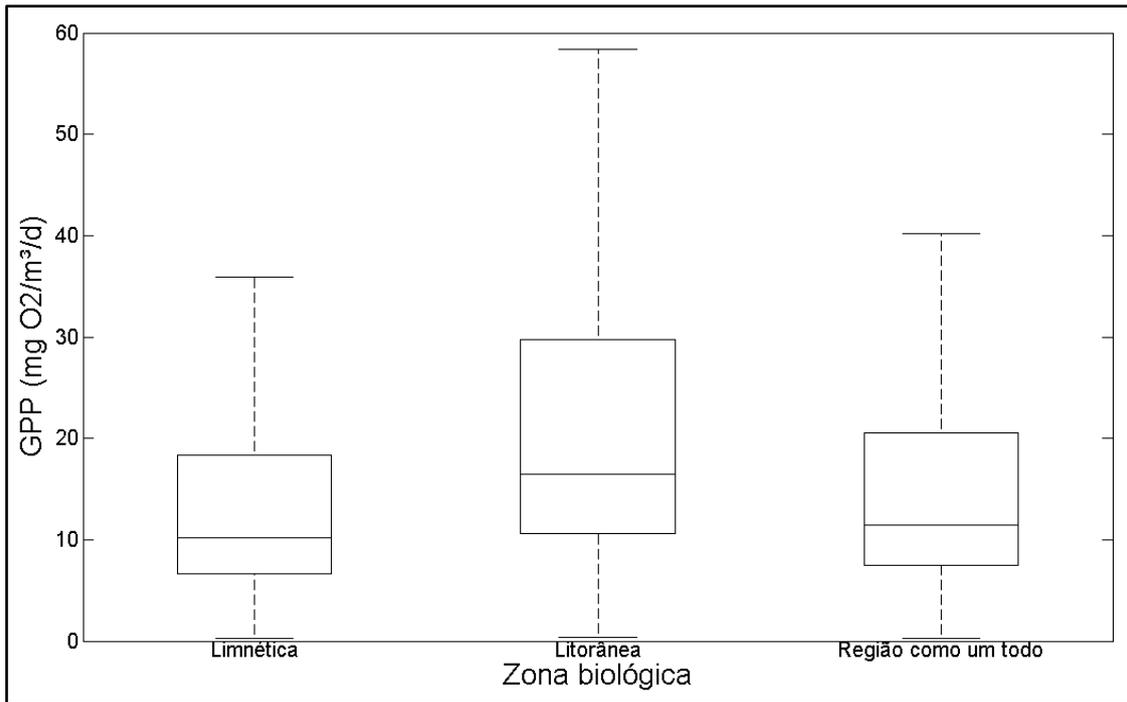


Figura 8.2 – Box-plot para o GPP entre zonas biológicas delimitadas para a região Norte. Cenário com vento observado.

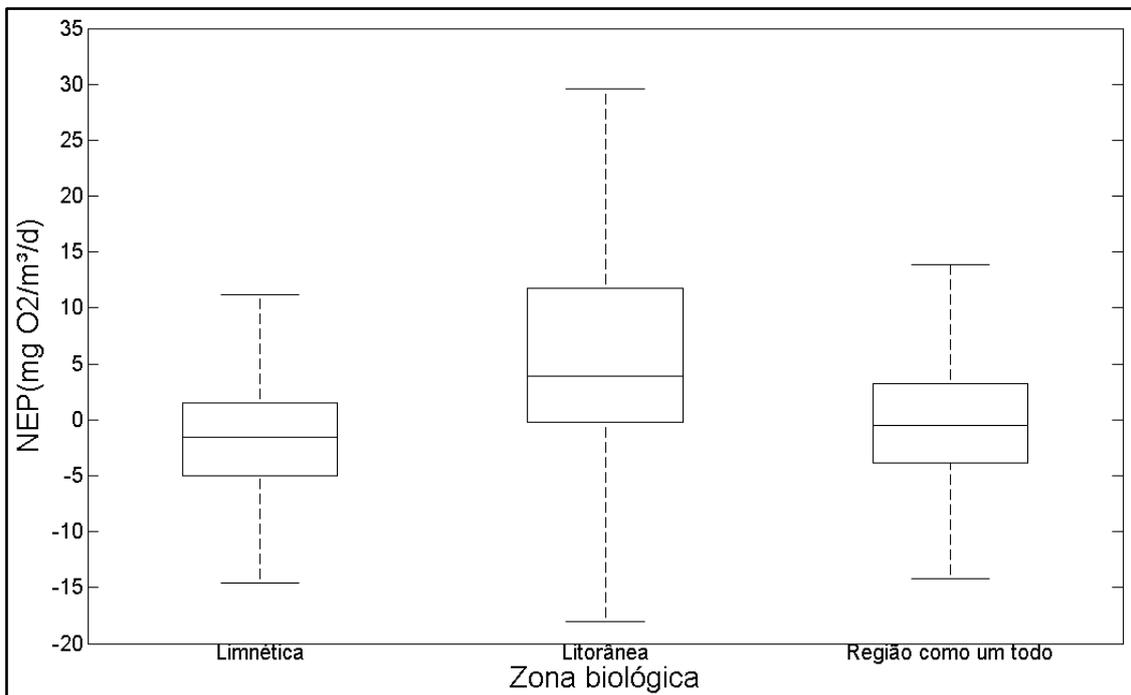


Figura 8.3 – Box-plot para o NEP entre zonas biológicas delimitadas para a região Norte. Cenário com vento observado.

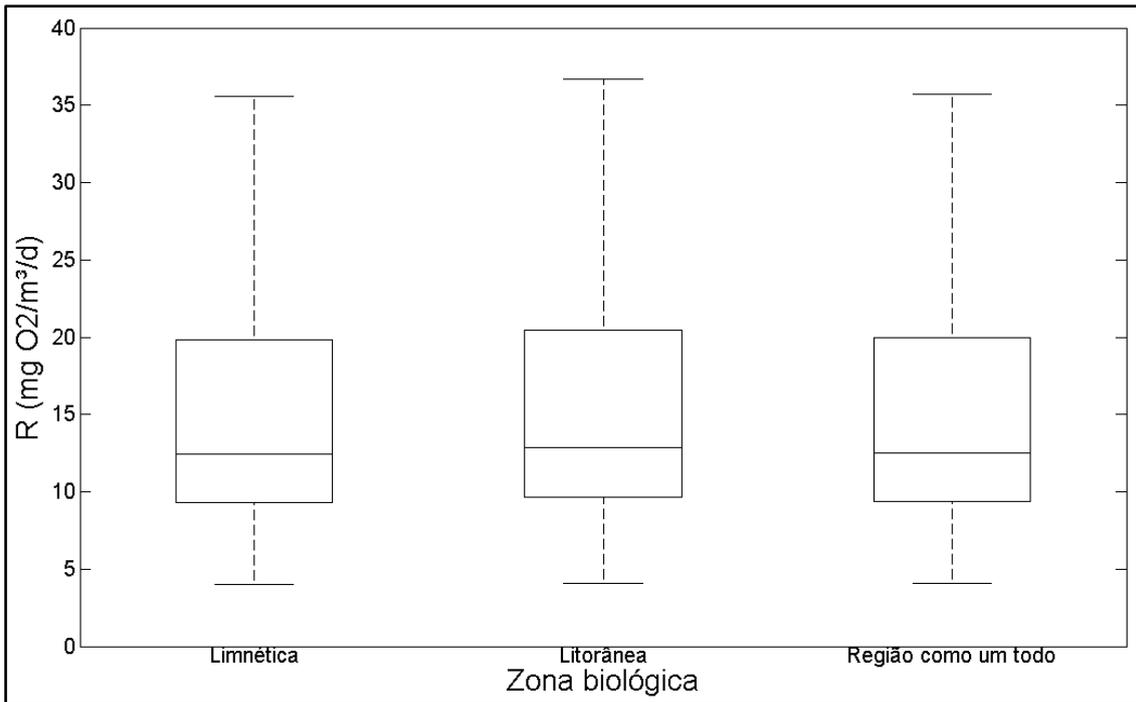


Figura 8.4 – Box-plot para R entre zonas biológicas delimitadas para a região Norte. Cenário com vento observado.

8.1.2 Região Central

As estimativas de metabolismo na região Central (Figura 8.1) também apresentaram o mesmo comportamento sazonal encontrado para a Lagoa Mangueira como um todo. O gradiente decrescente entre a zona litorânea e a zona limnética também foi observado para GPP (Figura 8.6), NEP (Figura 8.7) e R (Figura 8.8).

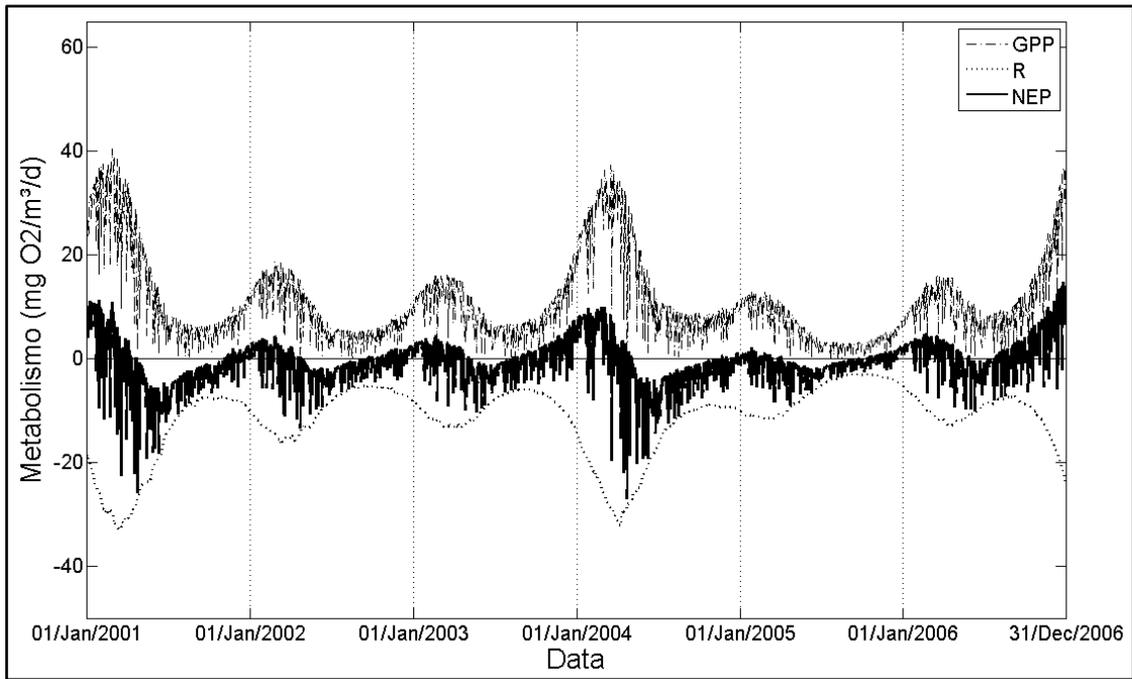


Figura 8.5 - Estimativa de metabolismo para a região Central da lagoa Mangueira no cenário com vento observado. Uma linha contínua marca o eixo onde GPP=R.

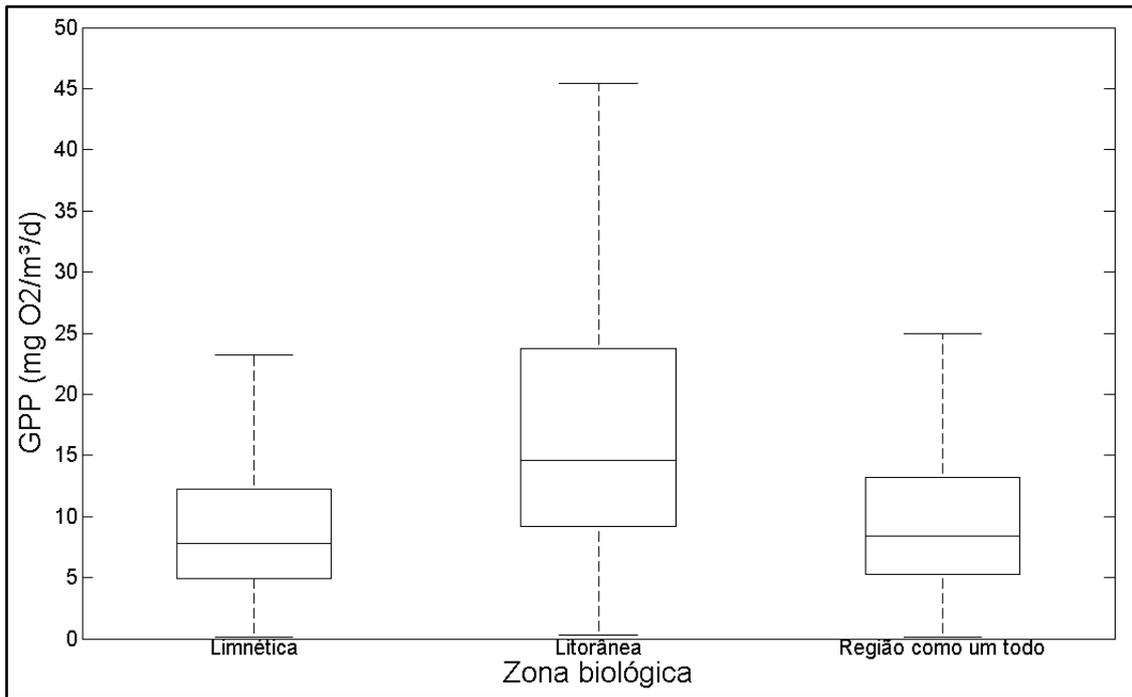


Figura 8.6 – Box-plot para GPP entre as zonas biológicas delimitadas para a região Central. Cenário com vento observado.

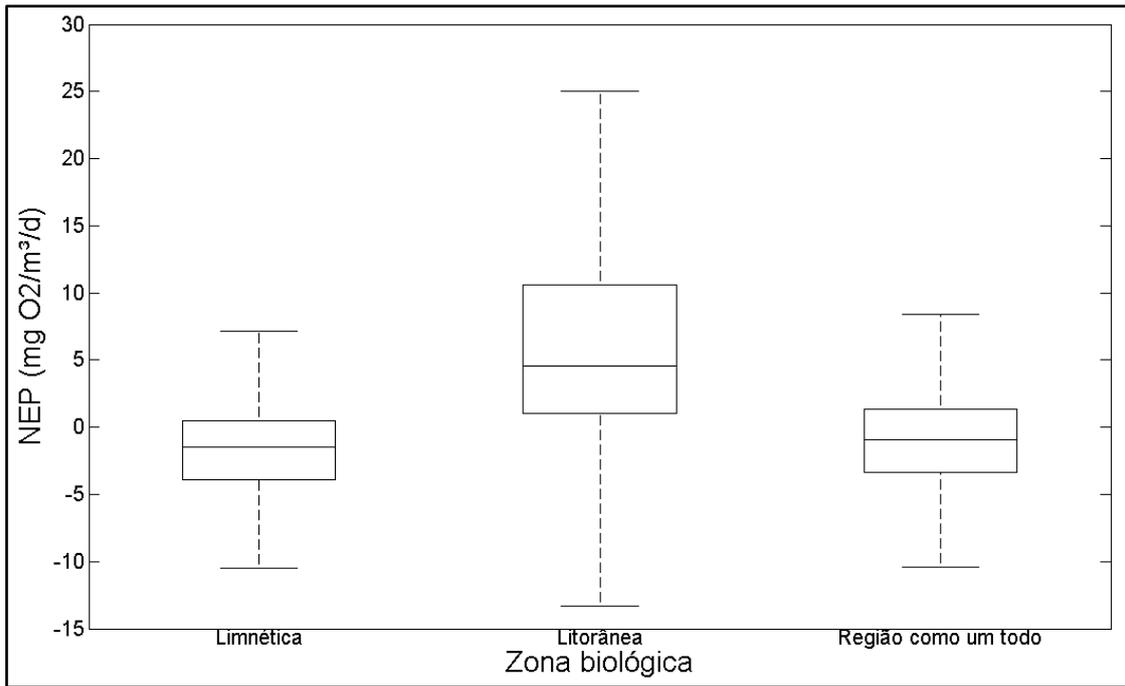


Figura 8.7 – Box-plot para NEP entre as zonas biológicas delimitadas para a região Central. Cenário com vento observado.

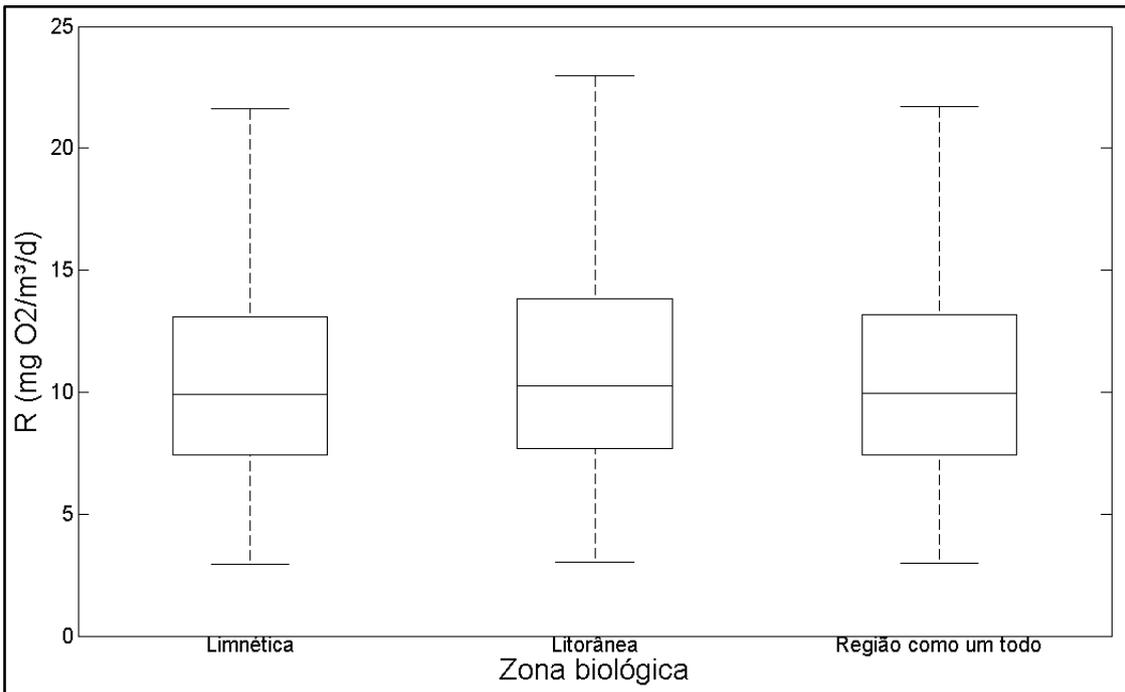


Figura 8.8 – Box-plot para R entre zonas biológicas delimitadas para a região Central. Cenário com vento observado.

8.1.3 Região Sul

As estimativas de metabolismo na região Sul (Figura 8.9) apresentaram o mesmo comportamento sazonal encontrado para a Lagoa Mangureira e as

demais regiões delimitadas. O gradiente decrescente entre a zona litorânea e a zona limnética também foi observado para GPP (Figura 8.10), NEP (Figura 8.11) e R (Figura 8.12).

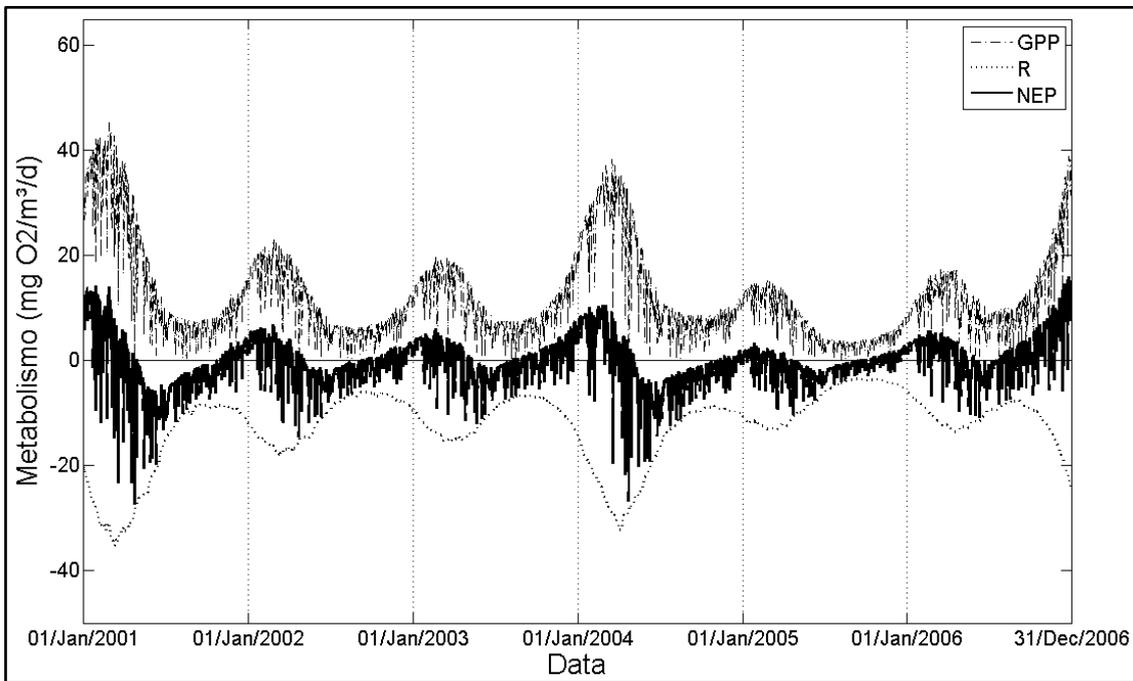


Figura 8.9 - Estimativa de metabolismo para a região Sul da Lagoa Mangueira no cenário com vento observado. Uma linha contínua marca o eixo onde GPP=R.

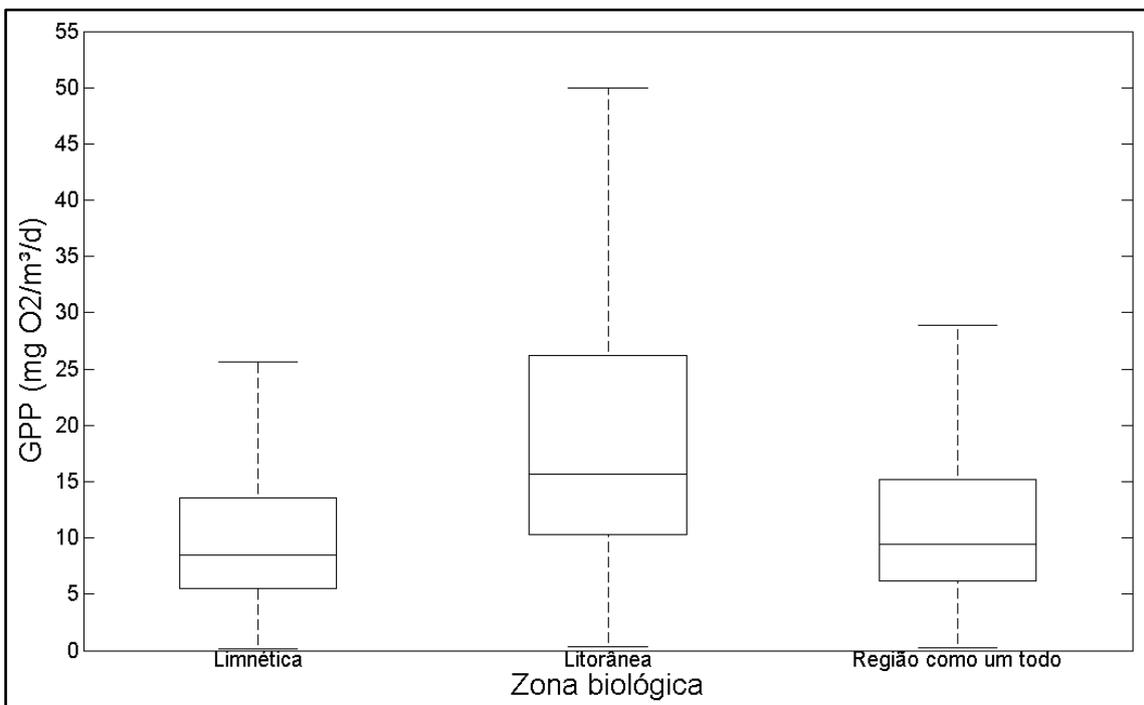


Figura 8.10 – Box-plot para GPP entre zonas biológicas delimitadas para a região Sul. Cenário com vento observado.

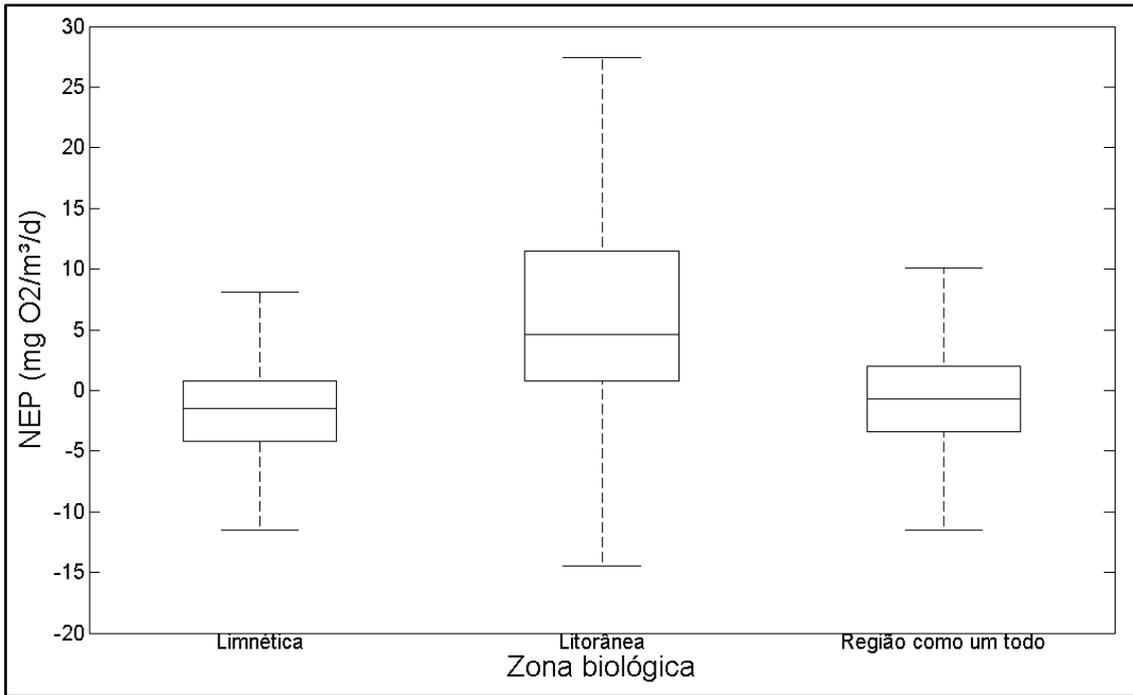


Figura 8.11 – Box-plot para NEP entre zonas biológicas delimitadas para a região Sul. Cenário com vento observado.

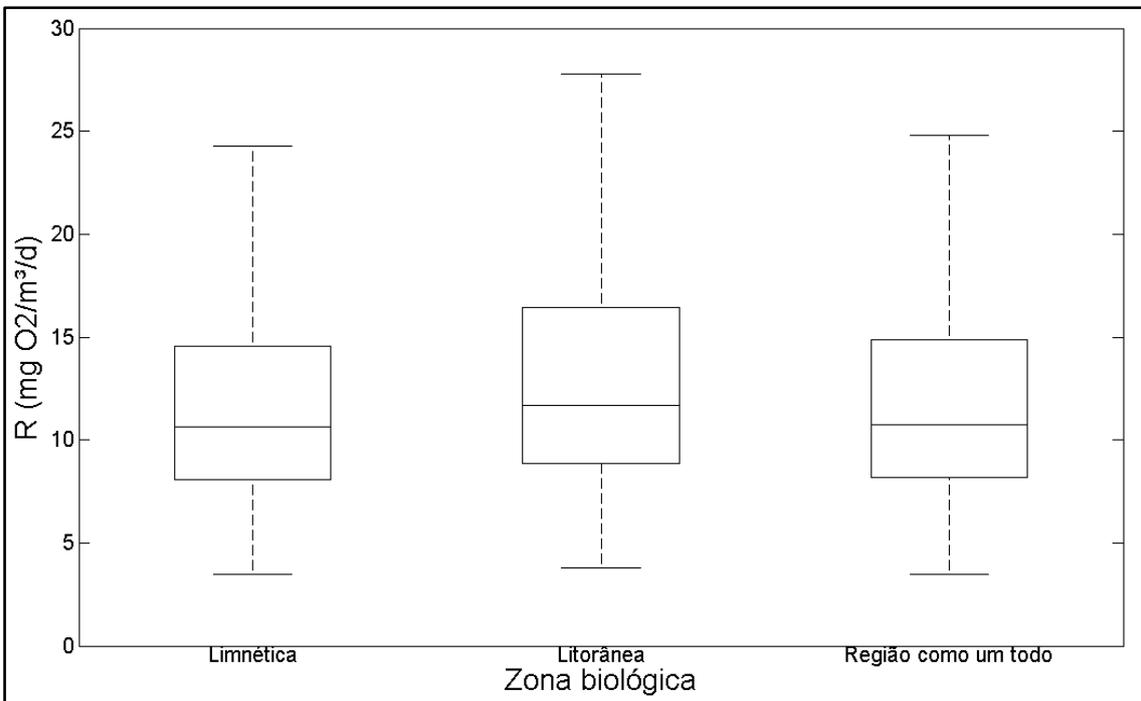


Figura 8.12 – Box-plot para R entre zonas biológicas delimitadas para a região Sul. Cenário com vento observado.

8.2 Estimativas de metabolismo: cenários de vento simulados

8.2.1 Cenário sem vento

Os valores das estimativas de metabolismo (GPP, NEP e R) no cenário sem vento apresentaram diferenças quando comparados as estimativas do cenário com vento observado. Assim como no cenário anterior, ocorre variação nas estimativas de GPP (Figura 8.13) entre as regiões geográficas, tendo valores mais similares o NEP (Figura 8.14) e R (Figura 8.15).

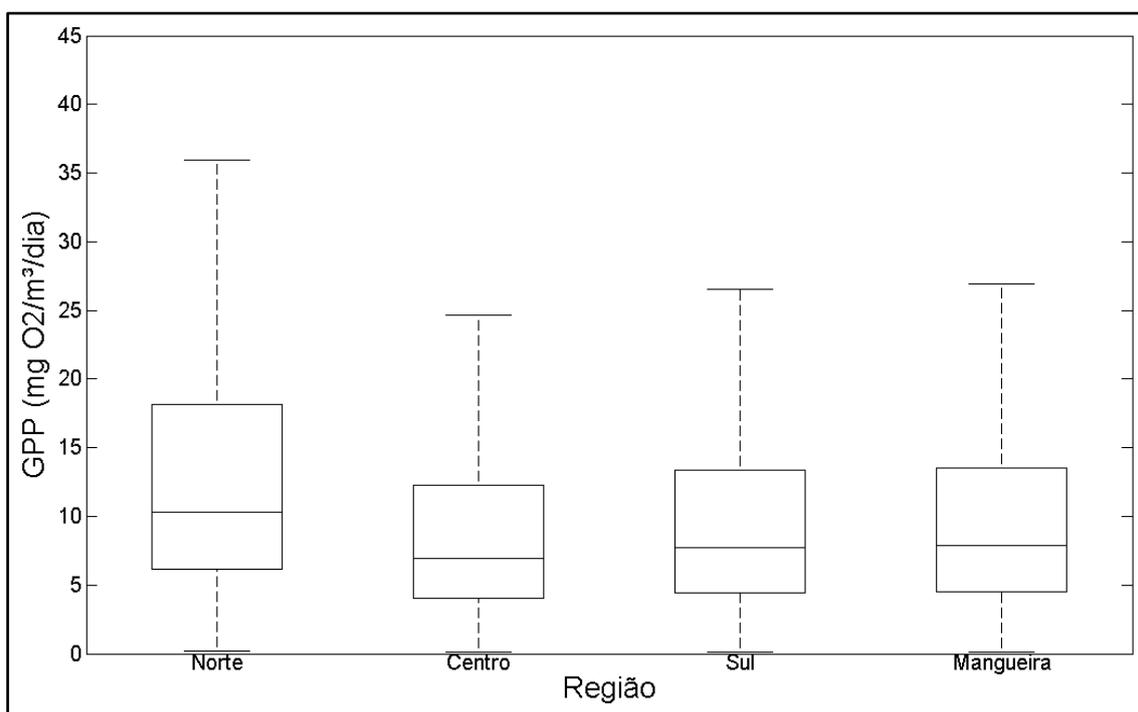


Figura 8.13 - Box-plot do GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário sem vento.

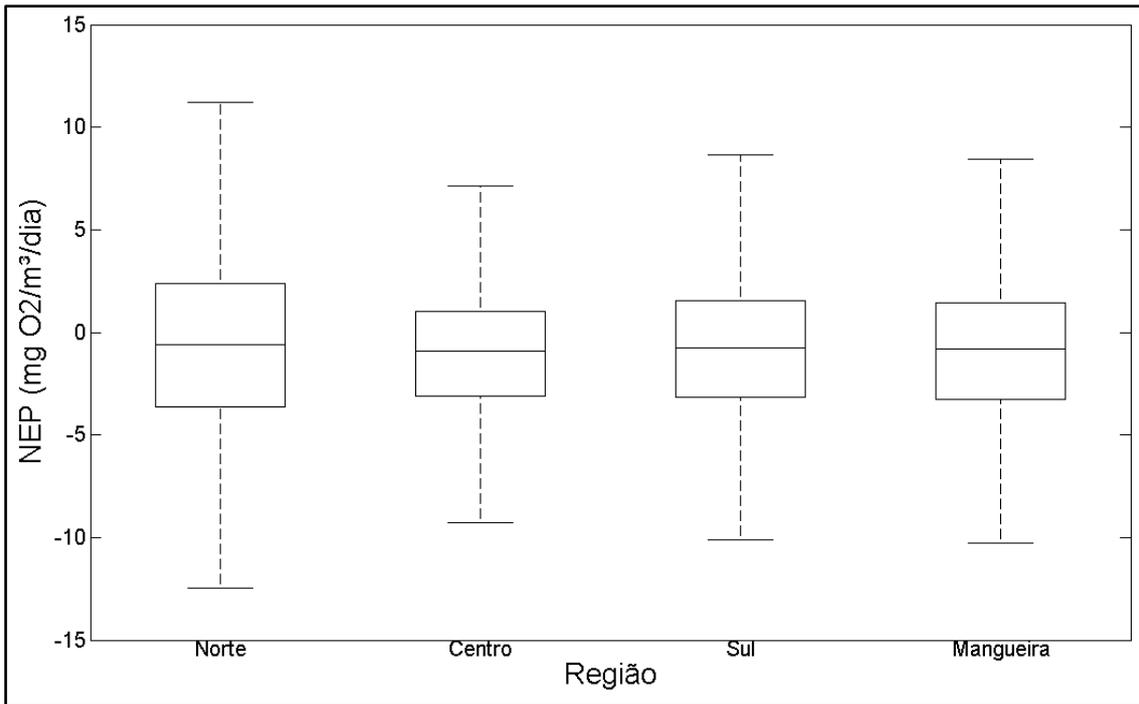


Figura 8.14 - Box-plot do NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário sem vento.

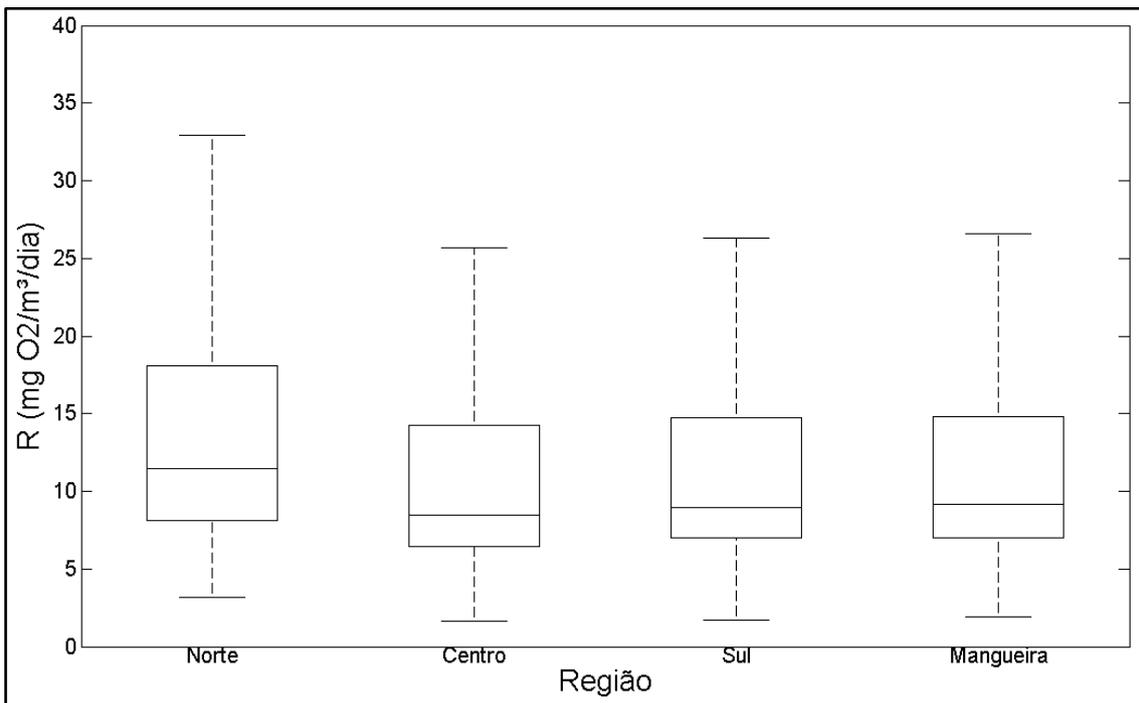


Figura 8.15 - Box-plot de R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário sem vento.

As velocidades da água encontradas possuíram valores baixos quando comparadas aos encontradas no cenário com vento observado, porém, a mesma variação entre regiões pôde ser observada (Tabela 8.1). A região

Central apresentou maior valor na velocidade média, no sentido sudeste (SE) noroeste (NW). O mesmo sentido sendo observado para a região Sul e para a lagoa Mangueira como um todo. O sentido obtido para a região Norte pode ser devido a sua morfologia ou a pouca movimentação de água (devido a entradas e saídas) existente nesta região.

Tabela 8.1 - Velocidades médias da água por região e para lagoa Mangueira no cenário sem vento.

Região	Comp. X (m/s)	Comp. Y (m/s)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)	Sentido
Norte	-0,0000013	-0,0000015	0,000002	49	N – S
Centro	0,000026	-0,000016	0,000031	-31	NW – SE
Sul	0,000012	-0,000012	0,000017	-46	NW – SE
Mangueira	0,000012	-0,00001	0,000016	-39	NW – SE

8.2.2 Cenário de vento com direções opostas

As estimativas de GPP (Figura 8.16) se mostraram variáveis entre regiões geográficas, obtendo um valor maior na região Norte e o menor valor na região Central. Os valores médios de NEP (Figura 8.17) e R (Figura 8.18) se mantiveram similares entre regiões.

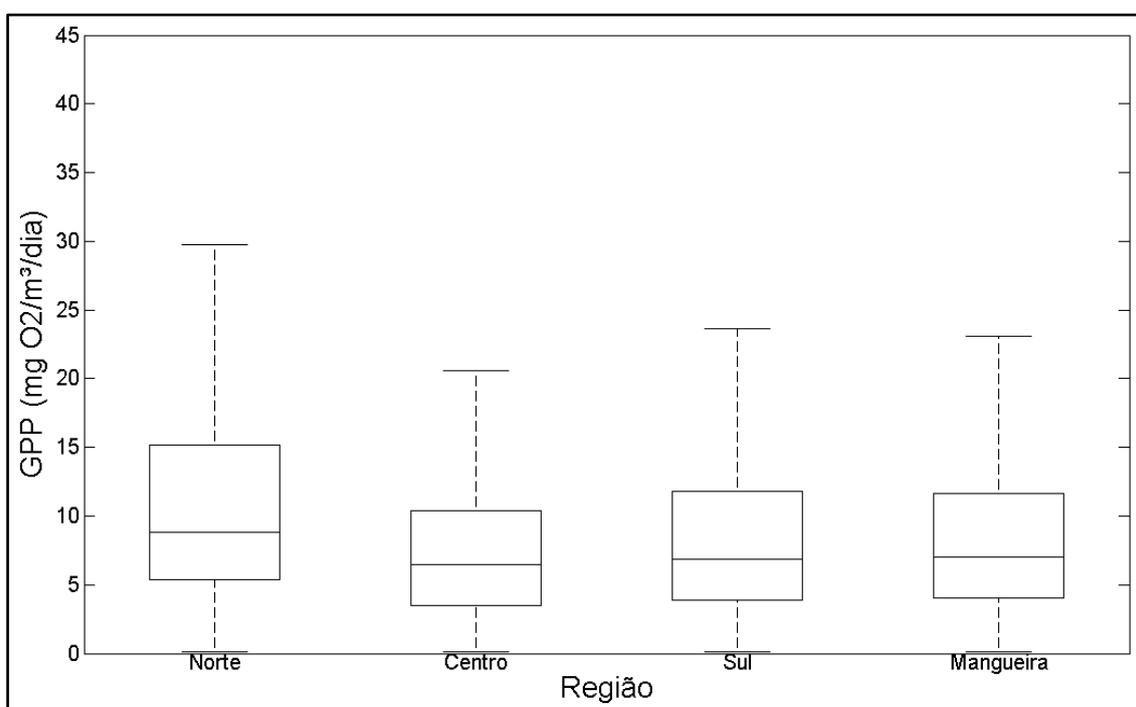


Figura 8.16 - Box-plot do GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com direções opostas.

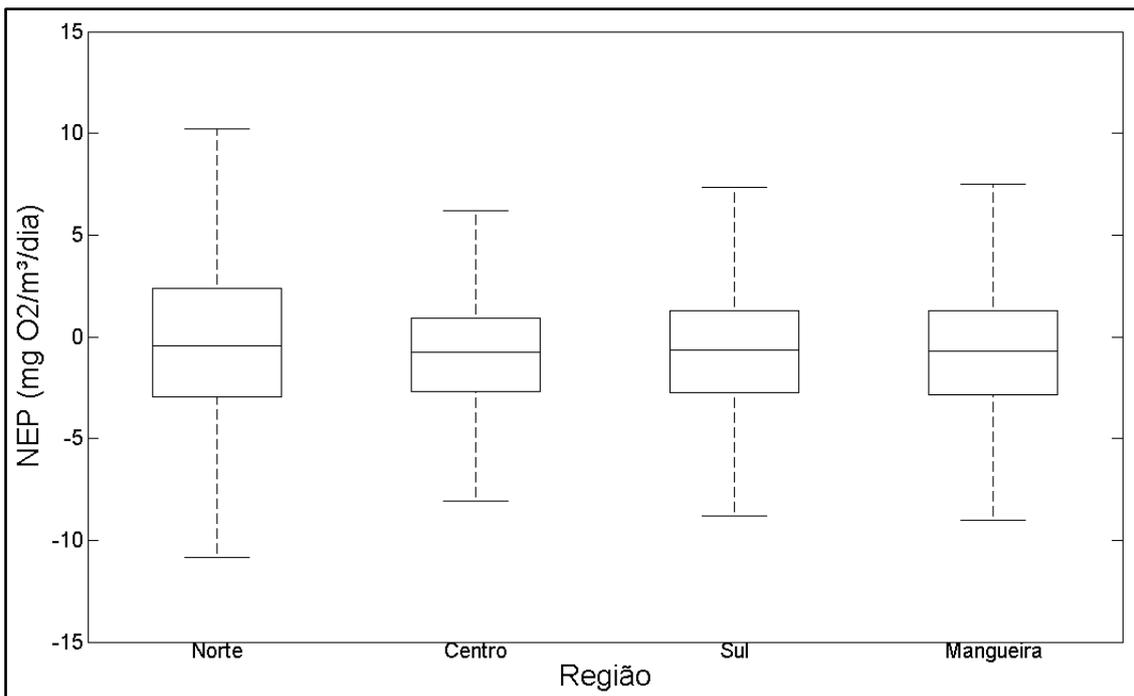


Figura 8.17 - Box-plot do NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com direções opostas.

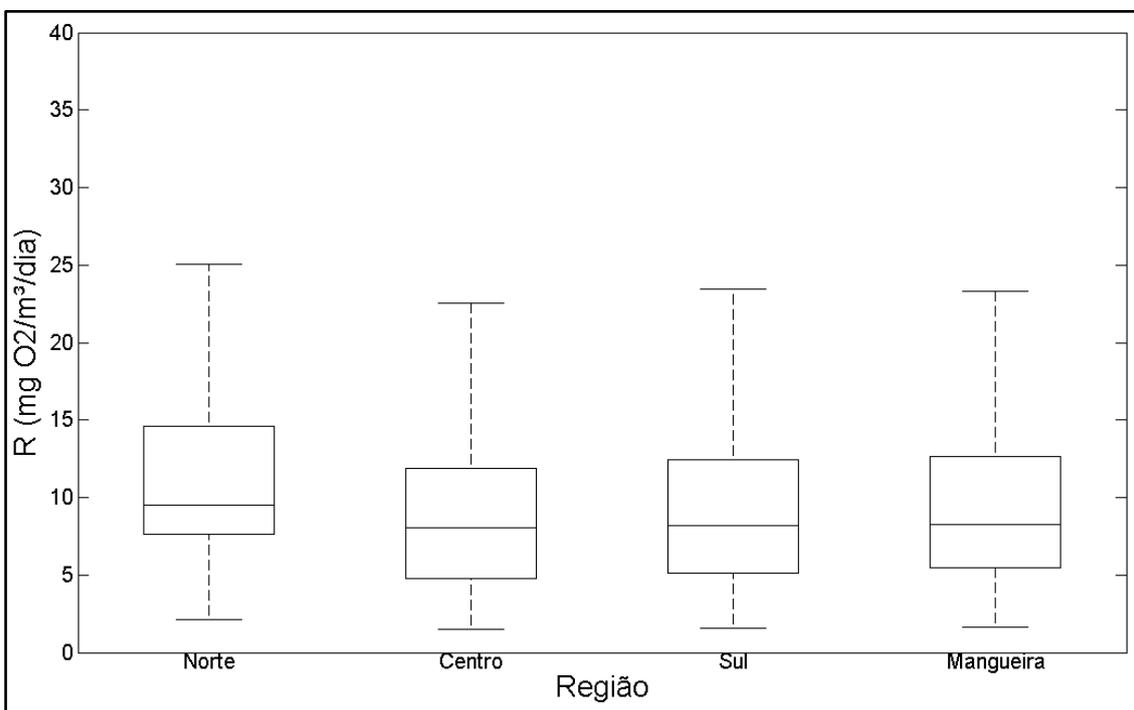


Figura 8.18 - Box-plot do R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com direções opostas.

As velocidades da água encontradas apresentaram variações de magnitude entre regiões. A principal diferença para o cenário com vento real

seria o sentido da velocidade resultante média (Tabela 8.2). Neste cenário, a região Central apresentou maior magnitude na velocidade média e predomínio do sentido Oeste (W) – Leste (E). A lagoa Mangueira como um todo apresentou predomínio do sentido Sudoeste (SW) – Nordeste (NE). O sentido encontrado para a velocidade média resultante para a lagoa Mangueira é o oposto ao sentido encontrado para o cenário com vento real. As regiões Norte e Sul também apresentaram este mesmo resultado. A região Central apresentou um sentido que não corresponde ao oposto do cenário com vento real. Isto pode ser atribuído à morfologia da própria lagoa ou as correntes de circulação hidrodinâmica que se formam e Respondem à direção do vento (Ji, 2008).

Tabela 8.2 - Velocidades médias por região e para lagoa Mangueira no cenário com direções trocadas.

Região	Comp. X (m/s)	Comp. Y (m/s)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)	Sentido
Norte	-0,000012	0,00014	0,000014	-85	S – N
Centro	0,00063	0,000038	0,00063	3	W – E
Sul	0,0002	0,000061	0,00021	17	SW – NE
Mangueira	0,00027	0,000079	0,00028	16	SW – NE

8.2.3 Cenário com vento constante

Os valores estimados de metabolismo (GPP – Figura 8.19, NEP - Figura 8.20 e R - Figura 8.21) apresentam valores maiores na região Norte, mantendo valores similares entre a região Sul e a lagoa Mangueira como um todo.

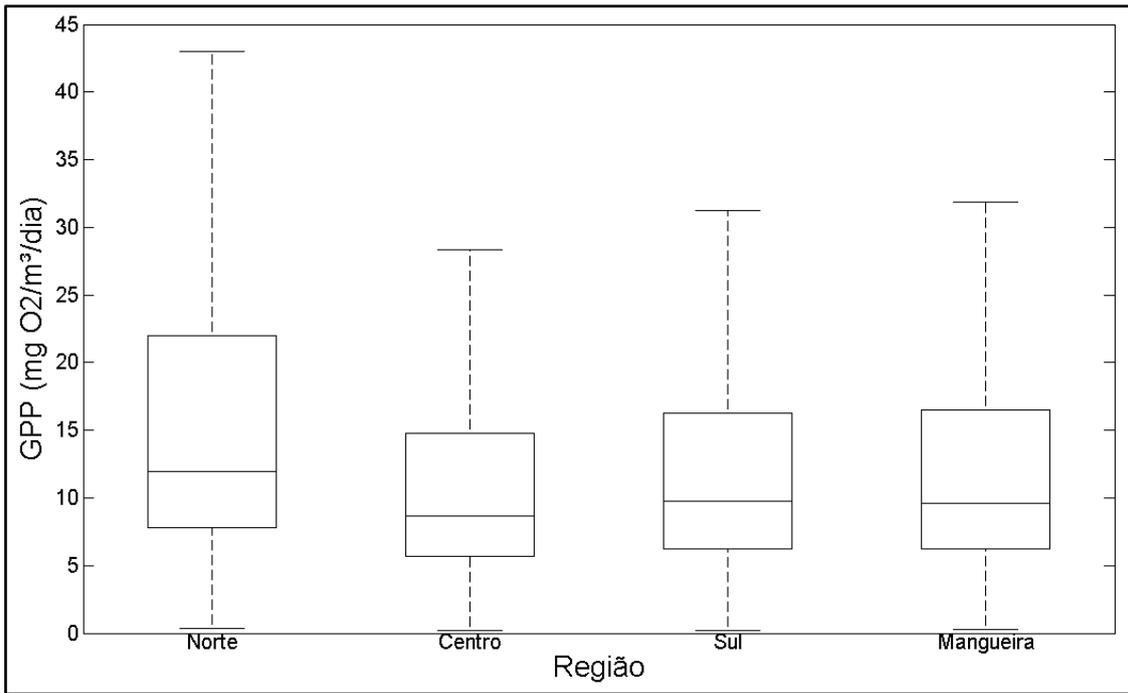


Figura 8.19 - Box-plot do GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento constante.

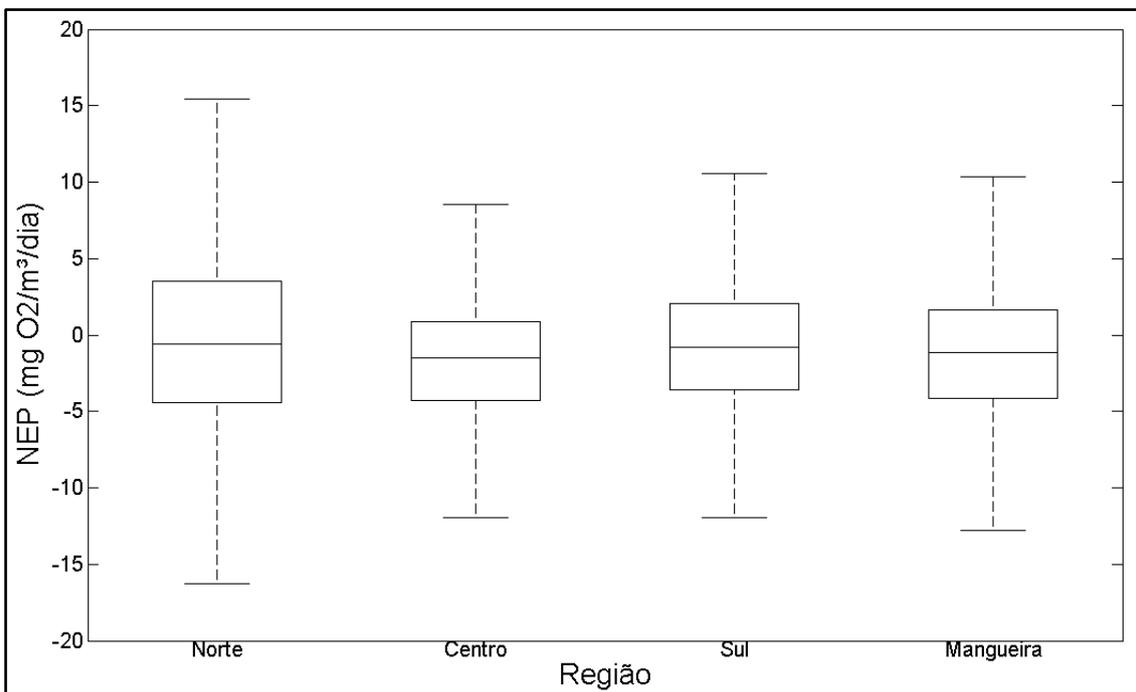


Figura 8.20 - Box-plot do NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento constante.

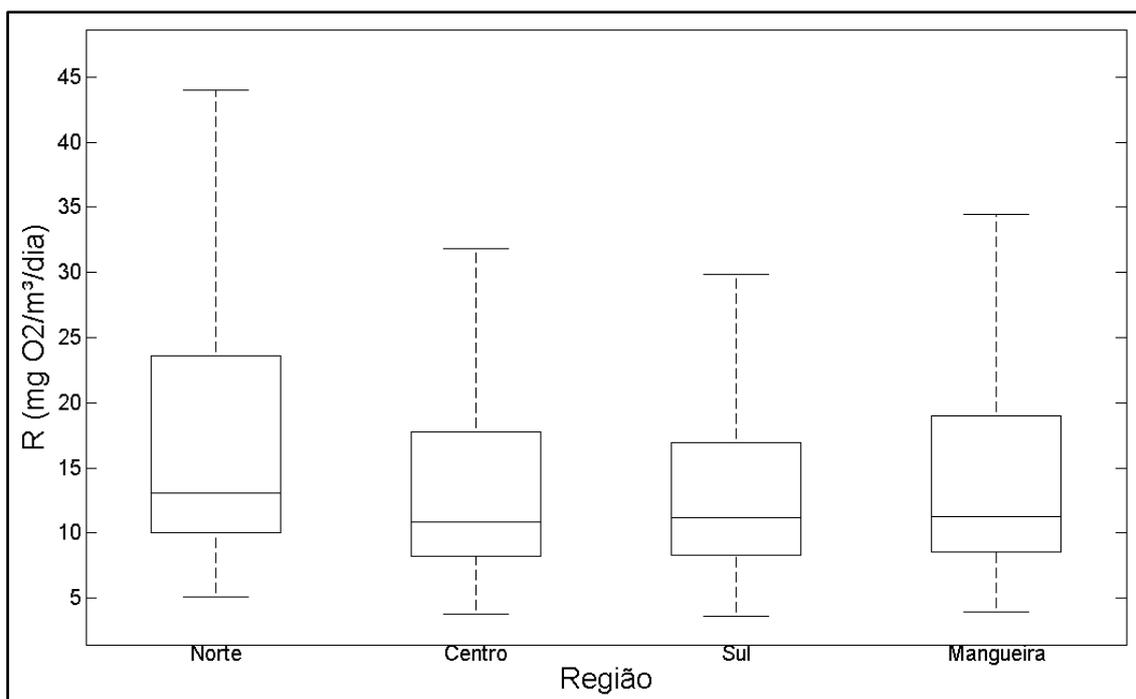


Figura 8.21 - Box-plot do R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento constante.

As velocidades médias da água encontradas no cenário com vento constante apresentaram variações de magnitude e sentido entre regiões (Tabela 8.3). Neste cenário, a região Sul apresentou maior magnitude na velocidade média e predomínio do sentido Norte (N) – Sul (S). A lagoa Mangueira como um todo apresentou predomínio do sentido Nordeste (NE) – Sudoeste (SW), direção constante da série de ventos utilizada. As regiões Norte e Central apresentaram sentidos diferentes, podendo ser atribuído a morfologia da lagoa.

Tabela 8.3 - Velocidades médias por região e para lagoa Mangueira no cenário com vento constante.

Região	Comp. X (m/s)	Comp. Y (m/s)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)	Sentido
Norte	-0,0073	-0,0059	0,0094	39	NE - SW
Centro	-0,0038	0,0013	0,004	-19	SE - NW
Sul	-0,0047	-0,012	0,013	69	N - S
Mangueira	-0,0053	-0,0059	0,0079	48	NE - SW

8.2.4 Cenário de vento com velocidade dobrada

Os valores estimados de metabolismo demonstram que a região Norte possui fluxo de GPP (Figura 8.22) maior do que os demais ambientes. Os

valores de NEP (Figura 8.23) entre essa região e os demais também foram diferentes. O fluxo de R (Figura 8.24) manteve valores similares para as regiões e para a lagoa como um todo.

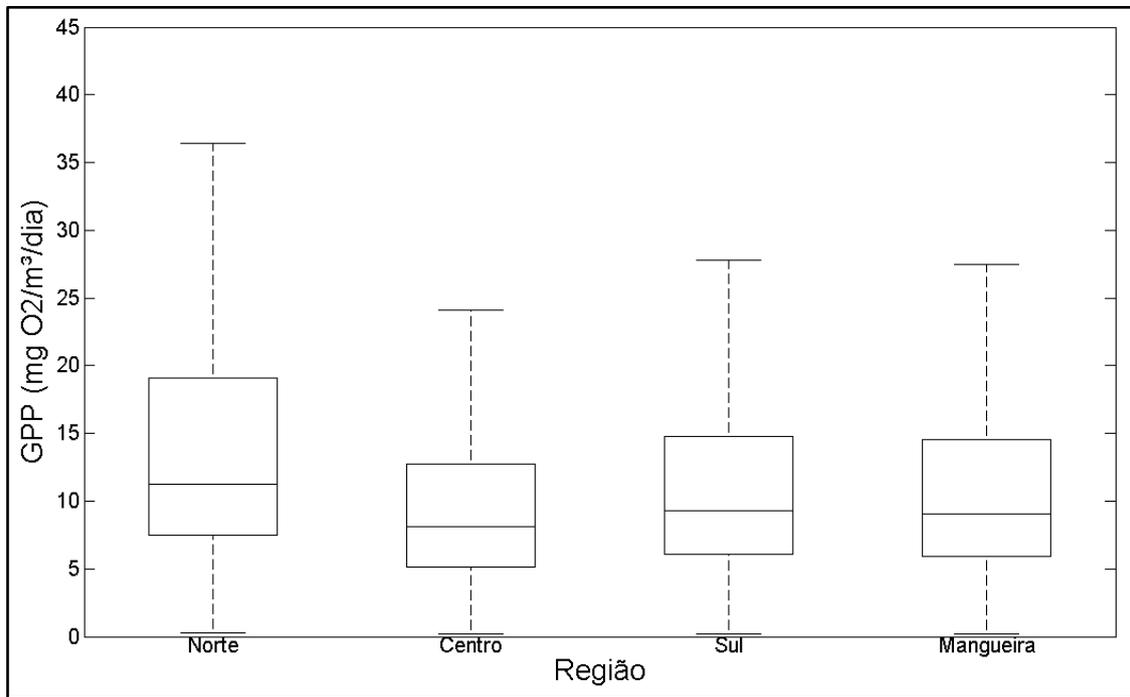


Figura 8.22 - Box-plot do GPP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com velocidade dobrada.

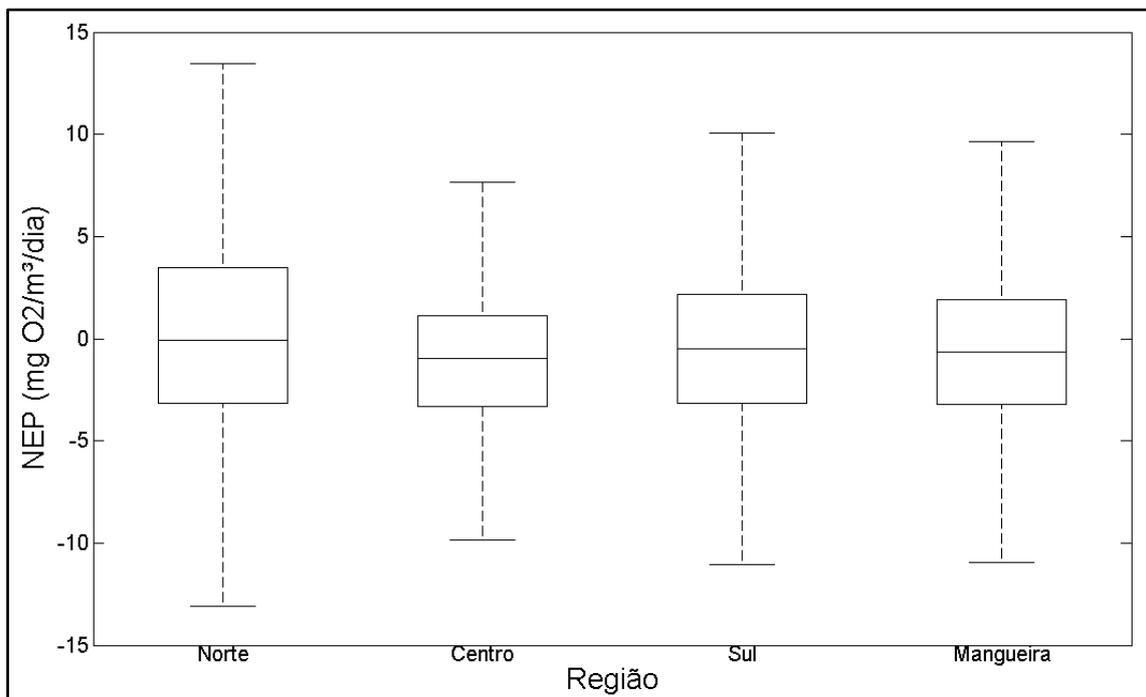


Figura 8.23 - Box-plot do NEP entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com velocidade dobrada.

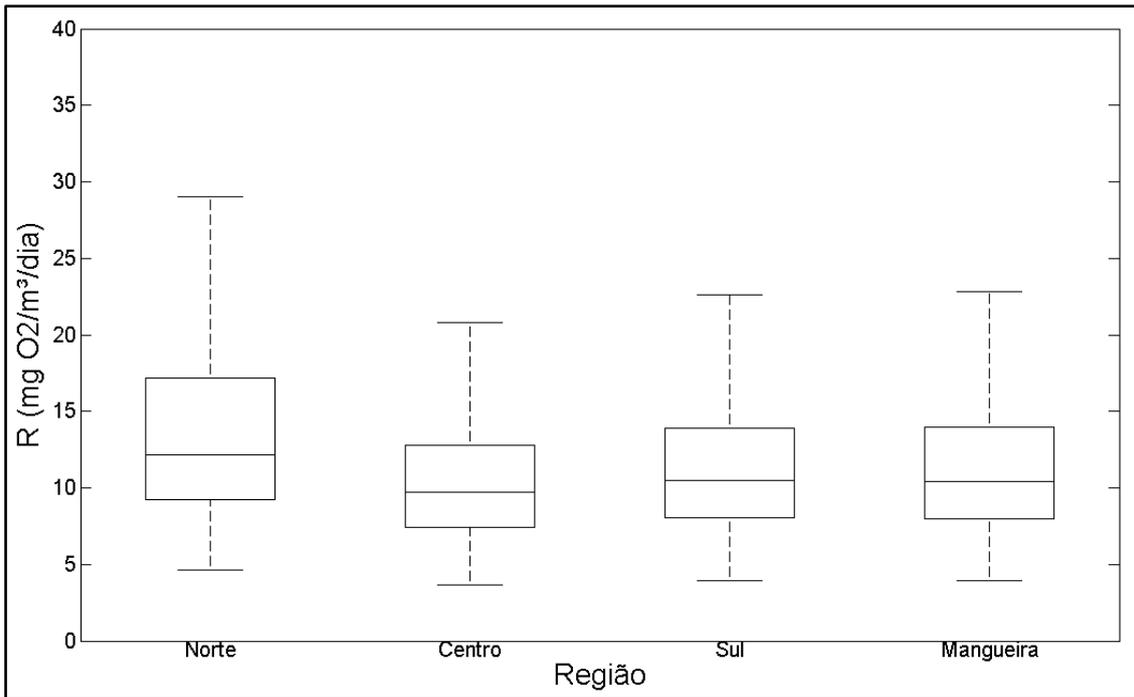


Figura 8.24 - Box-plot do R entre as regiões geográficas delimitadas para a lagoa Mangueira. Cenário de vento com velocidade dobrada.

As velocidades da água média encontradas apresentaram variação entre as regiões. A principal diferença para o cenário com vento real é a magnitude das velocidades encontradas (Tabela 8.4). No cenário com velocidade dobrada, a região Norte apresentou maior magnitude na velocidade média e predomínio do sentido Norte (N) – Sul (S), a região Central apresentou magnitude próxima, com sentido contrário. A lagoa Mangueira como um todo apresentou predomínio do sentido Nordeste (NE) - Sudoeste (SW), uma vez que as direções não foram alteradas.

Tabela 8.4 - Velocidades médias por região e para lagoa Mangueira no cenário com velocidade dobrada.

Região	Comp. X (m/s)	Comp. Y (m/s)	Velocidade (m/s)	Ângulo (°)	Sentido
Norte	-0,0012	-0,0016	0,002	53	N – S
Centro	0,00094	0,0015	0,0018	58	S – N
Sul	-0,00085	-0,0004	0,00094	25	NE – SW
Mangueira	-0,00039	-0,00017	0,00042	24	NE – SW