

Estudo da resposta hidrodinâmica de um lago costeiro submetido a cenários de vento constante com o modelo MIKE21.
Caso da Lagoa do Peri, Florianópolis - SC

Gabriela da Silva

Gabriela da Silva

**ESTUDO DA RESPOSTA HIDRODINÂMICA DE UM LAGO
COSTEIRO SUBMETIDO A CENÁRIOS DE VENTO
CONSTANTE COM O MODELO MIKE21.
CASO DA LAGOA DO PERI, FLORIANÓPOLIS - SC**

Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para a
Conclusão de Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.
Orientador: Prof Dr Davide Franco
Coorientador: Eng. Felipe Bier

Florianópolis, SC
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Gabriela

ESTUDO DA RESPOSTA HIDRODINÂMICA DE UM LAGO COSTEIRO
SUBMETIDO A CENÁRIOS DE VENTO CONSTANTE ATRAVÉS DO MODELO
MIKE21. : CASO DA LAGOA DO PERI, FLORIANÓPOLIS - SC /
Gabriela Silva ; orientador, Davide Franco ; coorientador,
Felipe Bier. - Florianópolis, SC, 2016.
89 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. hidrodinâmica.
3. vento. 4. lago costeiro. I. Franco, Davide. II. Bier,
Felipe. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

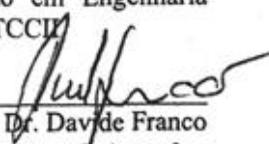
Gabriela da Silva

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**ESTUDO DA RESPOSTA HIDRODINÂMICA DE UM LAGO
COSTEIRO SUBMETIDO A CENÁRIOS DE VENTO
CONSTANTE COM O MODELO MIKE21.
CASO DA LAGOA DO PERI, SC.**

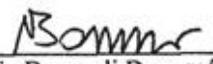
GABRIELA DA SILVA

Trabalho submetido à Banca Examinadora
como parte dos requisitos para Conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental – TCCII



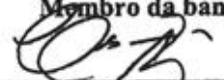
Prof. Dr. Davyde Franco
Orientador

Banca Examinadora:



Prof.ª Dr.ª Nadia Bernardi Bonumá

Membro da banca



Prof. Dr. Cesar Augusto Pompêo

Membro da banca

FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO, 2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à meus pais, Mara e Donizeti, pelo apoio, incentivo e pela inspiração através do exemplo de luta que são.

Agradeço ao Professor Davide Franco pela oportunidade de realizar um trabalho com o qual aprendi muito, pelas orientações e conhecimento compartilhado. Agradeço à toda equipe do LAHIMAR pela companhia e solidariedade. Ao engenheiro Felipe Bier pela coorientação, paciência e tempo dispendido.

Aos Professores Cesar Pompêo e Nadia Bonumá pela contribuição, tempo dispendido como banca examinadora, pelas belas palavras e ensinamentos. Ao Professor Fábio Farias pela atenção, paciência, simpatia e por disponibilizar seu tempo para auxiliar a elaboração deste trabalho. Aos demais professores do departamento que de alguma forma contribuíram para minha formação e realização deste trabalho.

Ao Adriano que auxiliou e acompanhou o desenvolvimento deste trabalho do início ao fim. Aos colegas do curso e em especial às grandes amigas que me acompanharam durante a graduação, sem as quais essa jornada teria sido um tanto mais penosa e sem graça, Milena, Rita, Thauana, Julia, Gabriela e Natalia.

RESUMO

Lagos costeiros são importante para sociedade, pois permitem a utilização múltipla de suas águas através do abastecimento público, recreação, pesquisa, entre outros. Para garantir esses usos, demandam a atenção de seus gestores, pois, não raro, sofrem ameaças de floração de cianobactérias com potencial tóxico. Para estudá-los, utiliza-se de modelos hidrodinâmicos que são capazes de representar o movimento de suas águas, permitindo seu gerenciamento adequado. A Lagoa do Peri, lago costeiro localizado no sul da ilha de Florianópolis (SC), é o objeto de estudo deste trabalho, que busca iniciar um estudo de sua hidrodinâmica, através do modelo MIKE21. Primeiramente, analisou-se a viabilidade da utilização de batimetrias simplificadas para representar as feições de circulação do lago real, os giros e seiche. As batimetrias simplificadas são: uma elipse simples (e) e uma elipse com um esporão triangular (t). Além disso, buscou-se entender as respostas do modelo frente às variações de intensidade (4 e 8 m/s) e direção (nordeste e sul) do vento. Variando-se essas entradas e adicionando-se um teste com vazões afluentes, foram realizadas 12 simulações no total. As respostas obtidas são apresentadas em termos de campos de velocidade e elevação da superfície. A simplificação demasiada da batimetria e impediu que esta apresentasse qualquer semelhança aos resultados obtidos com a batimetria real (r). A presença do esporão triangular na batimetria t alterou a circulação no lago, criando feições semelhantes àquelas obtidas com a batimetria r . As diferentes direções de vento aplicadas alteraram os giros formados e a distribuição espacial da intensidade da corrente, porém, manteve-se a média da corrente e a frequência de ocorrência das intensidades. O aumento da intensidade do vento intensificou a corrente, no entanto, a circulação apresentou as mesmas feições com formações de giros semelhantes. O módulo de transporte de partículas indicou as áreas em que as partículas acumularam-se para os ventos nordeste e sul. Para partículas dispersas no primeiro metro deste lago, o vento nordeste atuou levando-as para a região mais próxima à captação e às praias, enquanto que o vento sul as acumulou no lado oposto, próximo à encosta. Para partículas dispersas em camadas de 3,6 metros não houve uma área específica em que se acumularam. Ambas as direções de vento carregaram partículas próximas ao ponto de captação, nesta condição. Além disso, para os dois casos de vento algumas partículas permaneceram no giro ciclone ao norte, feição esta observada em todas as simulações com aplicação de vento.

PALAVRAS CHAVE: hidrodinâmica, lago costeiro, vento.

ABSTRACT

Coastal lakes are important to society because they have a fundamental role in the local ecosystem and provide multiple water usages, such as: public water supply, recreation, research, among others. Nevertheless, the water quality is constantly threatened due to the presence of cyanobacteria with high toxic potential. Therefore, it demands attention of managers. Hydrodynamic models have been used to study these systems because it is able to quantify aspects, such as velocity and surface elevation, and represent features of its dynamics, such as gyres and seiches. Thus, it provides substantial knowledge to an adequate management. The aim of this study is to start a study to understand the basic hydrodynamics due to wind blowing in a coastal lake, Lagoa do Peri, Florianópolis (SC). To understand the response of the model, it has been applied different wind directions (northeast and south) and intensities (4 and 8 m/s). It was analyzed if the real lake circulation features can be represented by simplified bathymetries. The constructed bathymetries are: bathymetry e , which is elliptical, bathymetry t , elliptical with a triangular cusplate. By varying these inputs and adding a test simulation with discharge, 12 simulations were complete. The results are presented and compared in terms of velocity, surface elevation and features formed as gyres and seiches. The bathymetry e didn't represent the same features created in the real bathymetry (r). The bathymetry t represented most of the features showed in bathymetry r due to the presence of the cusplate. The rise in the wind intensity intensified the current speed in the lake, but it did not change the features formed. The variation of wind direction changes the features formed and the distribution of the current speed in the lake, but it does not change the frequency of current speed formed. The particle tracking module showed the area where particles accumulate, depending on the wind direction. It has been used different layers to disperse the particles. The results show that the thicker the layer is, the longer it takes to accumulate on the border. The northeast wind carried particles in 1 meter deep layer to the east part of the lake, near the bath and water supply area. On the other hand, the south wind took particles to the opposite side of the lake. Particles in the first 3,6 meters were not accumulated in an specified area. Both wind directions took a few particles near the bath and water supply area. Also, it was observed that some particles still retained in the cyclonic gyre in the north of lake. This feature was present in all simulations with wind forcing.

KEY WORDS: hydrodynamics, coastal lake, wind.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação de Giro em Lagos. Adaptado de Ji e Jin (2016).	26
Figura 2 – Fenômeno de oscilação natural de um corpo d'água. Adaptado de Pereira (2010).	27
Figura 3 - Harmônicos de uma onda estacionária em um lago retangular. Adaptado de Dean e Dalrymple (1984).....	28
Figura 4 – Acúmulo de cianobactérias em determinadas regiões de um lago. Adaptado de OMS (2003).	29
Figura 5 – Mistura da Coluna d'água em um lago provocada pela tensão de cisalhamento do vento na superfície. Adaptado de Kjerfve e Magill (1989).	29
Figura 6 – Perfil simplificado de velocidade induzida pelo vento e reduzida pela rugosidade de fundo.	30
Figura 7 – Fluxo de energia e energia contida em lagos. Fonte: (IMBODEN; WÜEST, 1995).	33
Figura 8 – Altura de água total (h), altura de água remanescente (d) e elevação da superfície (η). Adaptado de DHI (2014).	35
Figura 9 – Malha computacional. Detalhe de Nó e Elemento.	37
Figura 10 – Coeficiente de arraste para a coluna d'água de um elemento cuja profundidade é de 7 metros e coeficiente de arraste de entrada é de 0,03. Adaptado de (DHI, 2014).	38
Figura 11 – Localização da Lagoa do Peri, detalhe da Bacia da Lagoa do Peri e Sub-bacias da Hidrografia principal.	40
Figura 12 - Sedimentos de Fundo da Lagoa do Peri e localização do esporão.	42
Figura 13 – Referência para direção do vento. Adaptado de DHI (2014).	43
Figura 14 – Ajuste dos dados de batimetria para cotas em relação ao mar e ao fundo da Lagoa.	44
Figura 15 – Profundidade, perfis e pontos de observação na Lagoa do Peri.	45
Figura 16 – Histograma de Profundidade e Histograma de Profundidade Acumulada da Lagoa do Peri.	46
Figura 17 – Gráfico da Área e Volume em função da cota de fundo da Cota do fundo da Lagoa do Peri.	46

Figura 18 - A - Curvas de Nível da batimetria <i>e</i> . B – Curvas de Nível da batimetria <i>t</i>	48
Figura 19 – A – Perfil AA (A) B – Perfil BB (A). O eixo x representa a batimetria (m) e o eixo y, a distância (m) ao longo do perfil.....	48
Figura 20 – Distribuição dos Coeficientes de Chezy ($m^{1/2}/s$) para Lagoa do Peri.....	49
Figura 21 – Fluxograma do pré-processamento de dados de entrada do modelo.	50
Figura 22 – Espessura das camadas de distribuição das partículas e sua classificação de acordo com o risco que representam.	52
Figura 23 - Fluxograma Síntese do Estudo.....	54
Figura 24 – Circulação nas batimetrias <i>t</i> (A) e <i>r</i> (B) gerada pela vazão base nos rios afluentes e canal sangradouro. Simulações 1 e 3 (os locais de entrada e saídas de vazão estão destacadas pelo círculo vermelho).....	55
Figura 25 – Relação entre as velocidades geradas pelas simulações 1 (Vazão Base) e 2 (Vazão Enchente), à esquerda. Detalhes da relação da Energia Cinética nos giros anticiclones gerados na parte superior (1) e inferior (2), à direita.	57
Figura 26 – Histograma de velocidades das simulações: 1 (Vazão Base), 2 (Vazão Enchente), 4 (Vazão Base e Vento $\theta=22^\circ$ e $u_w=4m/s$) e 5 (Vento $\theta=22^\circ$ e $u_w=4m/s$).....	58
Figura 27 – Circulação com Forçantes de Vento Nordeste, nas batimetrias <i>e</i> (A - simulação 6), <i>t</i> (B – simulação 5) e <i>r</i> (C - simulação 8).....	59
Figura 28 – Circulação gerada nas simulações 9 (A - $\theta=38^\circ$, $u_w=4m/s$) e 10 (B - $\theta=180^\circ$, $u_w=4m/s$).	61
Figura 29 – Relação entre a velocidade obtida através das simulações 5 ($\theta=22^\circ$, $u_w=4m/s$) e 10 ($\theta=180^\circ$, $u_w=4m/s$), à esquerda. Detalhe (1) da direção da corrente e energia na região do giro ciclone, formado pelo vento nordeste, à direita. (2) Detalhe da direção da corrente e energia na região do giro anticiclone, formado pelo vento sul, à direita.	63
Figura 30 – Histograma das Velocidades das simulações: 5 ($\theta=22^\circ$, $i=4m/s$), 9 ($\theta=38^\circ$, $u_w=4m/s$) e 10 ($\theta=180^\circ$, $u_w=4m/s$).	63
Figura 31 – Relação entre a velocidade obtida através das simulações 10 ($\theta=180^\circ$, $u_w=4m/s$) e 11($\theta=180^\circ$, $u_w=8m/s$), à	

esquerda. Detalhe da direção da corrente e energia na região do giro ciclone, à direita.....	64
Figura 32 – Histograma das Velocidades das simulações 10 ($\theta = 180^\circ$ e $u_w = 4\text{m/s}$) e 11 ($\theta = 180^\circ$ e $u_w = 8\text{m/s}$).....	65
Figura 33 – Diferença de nível da superfície da água causada pela atuação dos ventos: (A) Vento Sul a 8 m/s e (B) Vento Nordeste 38° 4 m/s.	67
Figura 34 – Elevação do nível da água em milímetros para os pontos de observação Ae (vermelho) e Ba (azul).	68
Figura 35 – Localização inicial das partículas (A). Circulação na Lagoa do Peri para forçantes constantes: (B) – Vento Nordeste (C) – Vento Sul.	69
Figura 36 – Transporte de partículas induzido pelo vento nordeste em condição de risco alto, após 2 (A), 4 (B), 6 (C) e 12 horas (D). Os valores de M_S e M_N estão apresentados nos cantos direito inferior e esquerdo superior, respectivamente, para auxiliar a leitura.	71
Figura 37 – Transporte de partículas induzido pelo vento sul em condição de risco alto, após 2 (A), 4 (B), 6 (C) e 12 horas (D). Os valores de M_S e M_N estão apresentados nos cantos direito inferior e esquerdo superior, respectivamente, para auxiliar a leitura.	72
Figura 38 - Transporte de partículas induzido pelo vento nordeste em condição de risco moderado, após 6 horas (A), 12 horas (B), 3 dias (C) e 9 dias (D). Os valores de M_S e M_N estão apresentados nos cantos direito inferior e esquerdo superior, respectivamente, para auxiliar a leitura.	73
Figura 39 - Transporte de partículas induzido pelo vento sul em condição de risco moderado, após 6 horas (A), 12 horas (B), 1 dia (C) e 3 dias (D). Os valores de M_S e M_N estão apresentados nos cantos direito inferior e esquerdo superior, respectivamente, para auxiliar a leitura.	74
Figura 40 – Velocidade nas Seções 1, 2, 3 e 4. A – Vento Nordeste e B – Vento Sul.	75
Figura 41 – Fluxo nas Seções 1, 2, 3 e 4. A cor vermelha representa o Vento Sul, e, azul, o Vento Nordeste.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de Coeficiente de Rugosidade Absoluta e Manning para os Sedimentos da Lagoa do Peri	31
Tabela 2 – Valores de Coeficiente de Chezy para algumas profundidades e sedimentos da Lagoa do Peri.	31
Tabela 3 – Profundidade dos pontos de observação.....	46
Tabela 4 – Características das batimetrias simplificadas e e t , e , real r :	48
Tabela 5 - Cenários Simulados	53
Tabela 6 – Velocidade Média da simulação 1, 2 e 3.	56
Tabela 7 - Velocidade Média das simulações 5, 6 e 8.....	60
Tabela 8 – Velocidade Média para os cenários de Vento Nordeste e Sul. Simulações 9 e 10.....	62
Tabela 9 – Energia Contida para as simulações com vento.....	66
Tabela 10 – Fluxo Residual na Seção e Fluxo Total	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Altura da coluna de água	[m]
Θ	Ângulo de referência da direção do vento	[°]
e	Batimetria elíptica	[m]
t	Batimetria elíptica com esporão triangular	[m]
r	Batimetria real	[m]
c_d	Coefficiente de arraste do vento	-
C	Coefficiente de Chezy	[m ^{1/2} /s]
D	Coefficiente de dispersão horizontal	[m ² /s]
n	Coefficiente de Manning	[s/m ^{1/3}]
c_w	Coefficiente de perfil induzido pelo vento	-
c_f	Coefficiente de rugosidade de fundo	m
ε	Coefficiente de rugosidade absoluta	m
CFL	Coefficiente de Courant-Friedrich-Lewy	-
l_e	Comprimento mínimo de um elemento	[m]
l	Comprimento da onda	[m]
Z_0	Cota com referencial no nível do mar	[m]
Z_f	Cota com referencial no fundo do lago	[m]
ρ	Densidade da água	[kg/m ³]
$H_{m\acute{a}x}$	Altura máxima de coluna d'água	[m]
ρ_a	Densidade do ar	[kg/m ³]
E	Energia cinética	[J/m ²]
E_R	Energia cinética de referência	[J/m ²]
S	Magnitude de descarga da fonte	[m ³ /s]
η	Nível de referência da água	[m]
n_h	Número do harmônico da onda	-
T	Período de oscilação do seiche	[s]
L	Pista de atuação do vento no lago	[m]
R_h	Raio Hidráulico	[m]
τ_s	Tensão de cisalhamento do vento	[N/m ²]
$\bar{\tau}_b$	Tensão de cisalhamento de fundo	[N/m ²]
T_{xx}	Tensão lateral ou tangencial	[N/m ²]
$d_{t\acute{m}in}$	Tempo de integração mínimo do elemento	[s]

Símbolo	Descrição	Unidade
Q_e	Vazão de entrada	[m ³ /s]
Δh	Variação da altura da coluna d'água	[m]
$U_{\tau s}$	Velocidade causada pela tensão do vento	[m/s]
u_w	Velocidade do vento	[m/s]
\bar{u}_b	Velocidade da corrente acima do fundo	[m/s]
u_m	Velocidade média da corrente (magnitude)	[m/s]
\bar{u}	Velocidade média da corrente no eixo x	[m/s]
\bar{v}	Velocidade média da corrente no eixo y	[m/s]
V_R	Velocidade de referência	[m/s]
c_{model}	Velocidade do modelo	[m/s]
c_{onda}	Velocidade da onda	[m/s]
V_l	Volume de uma célula do modelo	[m ³]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	LAGUNAS, LAGOAS E LAGOS	23
2.2	HIDRODINÂMICA EM LAGOS	24
2.2.1	Ação do Vento em Lagos	25
2.3	RUGOSIDADE DE FUNDO	30
2.4	ENERGIA EM LAGOS	32
2.5	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	33
2.5.1	Modelo Numérico Hidrodinâmico para Águas Rasas	34
3	METODOLOGIA	40
3.1	ÁREA DE ESTUDO: LAGOA DO PERI	40
3.2	DADOS DE ENTRADA	42
3.2.1	Dados Meteorológicos	42
3.2.2	Batimetria Real	43
3.2.3	Batimetria Simplificada	47
3.2.4	Coefficientes de rugosidade na Lagoa do Peri	49
3.3	PARÂMETROS INTERNOS AO MODELO HIDRODINÂMICO	50
2.2.2	Transporte de partículas e seus parâmetros	51
3.4	TESTE COM VAZÕES	52
3.5	SIMULAÇÕES	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	RESPOSTA À VAZÃO ASSOCIADA AO VENTO	55
4.2	O EFEITO DA BATIMETRIA	58
4.3	EFEITO DA VARIAÇÃO NA DIREÇÃO VENTO	61
4.4	A VARIAÇÃO NA INTENSIDADE DO VENTO	64

4.5	ENERGIA CONTIDA E POTÊNCIA DO VENTO	65
4.6	ELEVAÇÃO NA SUPERFÍCIE DA ÁGUA E O SEICHE	67
4.7	MOVIMENTO DE PARTÍCULAS EM r E FLUXO	68
5.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	78

1. INTRODUÇÃO

Lagos costeiros são ecossistemas importantes por sua atuação na produção de nutrientes para sistemas costeiros, preservação da biodiversidade e, principalmente, por possibilitar usos múltiplos de sua água como: recreação, pesca, pesquisa, turismo e abastecimento de água. São corpos de água sensíveis, seu gerenciamento é complexo e requer uma visão interdisciplinar, abrangendo conhecimento de ecologia e hidrodinâmica, bem como das ciências socioeconômicas e computacionais. O objeto de estudo deste trabalho é a Lagoa do Peri. Trata-se de um lago costeiro de águas doces, localizado no Parque Municipal da Lagoa do Peri, criado em 1981 e considerado um dos principais ecossistemas em estágio de preservação e regeneração da Mata Atlântica original, além de ser classificado como área de Floresta Remanescente e patrimônio Natural do Município de Florianópolis (PENTEADO, 2002). A Lagoa do Peri é o maior reservatório natural de água doce de Florianópolis, que chega a atender até 113.000 habitantes no verão, o sistema Costa Leste/Sul (CASAN, 2016). A captação, tratamento e distribuição dessa água são serviços prestados pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN).

O aumento do contingente populacional, com consequente aumento na demanda por água potável, associado ao aumento da densidade de fitoplânctons na Lagoa do Peri, preocupa os gestores e demanda atenção dos institutos de pesquisa. Soma-se a isto, o fato de que há crescente dominância da cianobactéria *Cylindrospermopsis raciborskii*, cuja potencialidade de liberar substâncias tóxicas na água é considerada alta (HENNEMANN; PETRUCIO, 2010, TEIVE; LISBOA; PETRUCIO, 2008).

A capacidade de prever mudanças em corpos lagunares depende da integração do conhecimento dos processos hidrológicos e dinâmicos (KJERFVE, 1994). Isso porque nesses sistemas, os processos de natureza química, biológica e geológica também estão intimamente ligados aos processos que determinam sua hidrografia e circulação (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). Estudos relacionam a taxa de variação da comunidade de cianobactérias em reservatórios de águas rasas às variações hidrodinâmicas induzidas pelo vento (CARDOSO; MARQUES, 2003; WU *et al* 2013). Baptista e Nixdorf (2014) afirmam que a circulação permanente de um lago gera um ambiente com baixo nível de perturbação, e mostram que esta pode ser a possível causa da dominância da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii* na Lagoa do

Peri. Portanto, o entendimento da dinâmica da massa de água desses corpos é essencial para entendê-los e melhor gerenciá-los. Apesar disso, são inexistentes estudos da hidrodinâmica da Lagoa do Peri.

A dinâmica dos fluidos pode ser descrita por equações matemáticas diferenciais parciais, que são complexas de solucionar através de técnicas analíticas clássicas. Por isso, utiliza-se de modelos matemáticos computacionais (ABBOTT; BASCO, 1989). Modelos matemáticos hidrodinâmicos, mais especificamente, representam o escoamento da água em corpos naturais complexos, por meio das equações de Navier Stokes, utilizando de instrumentos como a discretização em volumes finitos (ROSMAN, 2015). A dimensão da análise pode variar em: tridimensional, bidimensional e unidimensional. Como maneira de simplificar os estudos, entender melhor os processos que ocorrem nos corpos d'água e estender suas conclusões, frequentemente se utiliza de batimetrias simplificadas (ANNYAH; SEMAZZY, 2009).

Este trabalho utilizará o modelo hidrodinâmico bidimensional, MIKE 21, cedido pela *Danish Hydraulic Institute* (DHI) em convênio com o Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar), e visa iniciar um estudo com intuito de preencher lacunas quanto às questões hidrodinâmicas na Lagoa do Peri. Parte-se da hipótese de que o vento seja o principal motor da circulação da água na Lagoa do Peri que, conseqüentemente, age sobre as cianobactérias presentes neste sistema.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é compreender a resposta, através de um modelo hidrodinâmico bidimensional, de um lago costeiro, raso, e de pequenas dimensões, baseando-se nas características físicas da Lagoa do Peri, ao ser submetido a determinados cenários de vento constante.

Para isso, os objetivos específicos são:

- Comparar a resposta do modelo para batimetrias simplificadas (menos complexas) e reais (mais complexas), verificando as limitações na representação das feições formadas;
- Entender a resposta do modelo para aplicações de vento de diferentes intensidades e direções em termos de velocidade média, elevação da superfície e formação de giros e seiches;
- Observar a resposta do módulo de transporte de partículas na batimetria real para os principais ventos, nordeste e sul.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LAGUNAS, LAGOAS E LAGOS

Esteves (1998) define lagos como corpos d'água interiores, sem comunicação direta com o mar e suas águas, as quais têm baixo teor de íons dissolvidos, quando comparadas às águas oceânicas. Lagoas e lagunas têm sua gênese vinculada aos mesmos processos transgressivos do mar, com início no pleistoceno prolongado aos últimos dois mil anos, onde se formaram a grande maioria das lagunas costeiras do Brasil. Lagoas e lagunas podem ser formadas pelo isolamento da enseada marinha ou braço de mar, desenvolvido a partir de pontões rochosos. Diferem-se após sua formação, através do isolamento de uma enseada ou de um braço de oceano, pois podem permanecer ligadas ao mar por fluxo e refluxo, caracterizando uma laguna, ou isolar-se do mar sem refluxo, caracterizando uma lagoa.

Kjerfve (1994), por sua vez, define lagunas costeiras como corpos de água costeiras orientados paralelamente à costa, ocupam depressões costeiras e são separadas do mar por uma barreira e conectadas a este por um ou mais canais, que podem ser obstruídos ocasionalmente. Segundo Kjerfve e Magill (1989), lagunas podem ou não sofrer influência de marés e salinidade; e, variam, portanto, de lagos costeiro de águas doces a lagunas hipersalinas. Estes autores classificam lagunas costeiras de diferentes formas de acordo com a geomorfologia de sua ligação com o oceano:

- Sufocada. Caracterizada por uma conexão com o mar longa e estreita, tempos de residência longos e cuja força dominante é o vento.
- Restrita. Apresenta duas ou mais conexões com o oceano. É influenciada pela maré e ventos e, frequentemente, apresenta mistura homogênea verticalmente.
- Vazada. Caracterizada por grande comprimento ao longo da costa, frequentemente mais de 100 km, e pequena largura, não mais de alguns quilômetros. São frequentes em costas onde a energia da maré é mais influente que a energia das ondas.

Esta classificação pode ser relacionada à hidrodinâmica do sistema. Quanto mais limitada é a troca de água com o oceano, maior o tempo de residência no sistema (Hatcher *et al.*, 1987 *apud* Kjerfve e Magill, 1989).

A Lagoa do Peri apresenta características peculiares: sua profundidade é maior que a maioria dos sistemas classificados como

lagoas, além disso, não sofre influência de maré e salinidade. Adotou-se, portanto, a classificação de Kjerfve e Magill (1989), em que este corpo d'água é tido como: lago costeiro de água doce, por não sofrer influência da maré e salinidade; e sufocado, de acordo com a geomorfologia de sua ligação com o oceano. Apresenta assim, tempo de residência alto e determinado, principalmente, pelo parâmetro da vazão dos rios (afluentes e sangradouro), onde a força dominante é o vento, e desconsidera-se o transporte causado por circulação gravitacional e/ou volume perdido por evaporação, devido sua pequena área superficial (5,07 km²).

A despeito de sua importância ecológica e socioeconômica, lagos e lagoas costeiras são ecossistemas menos estudados que estuários, pois a maior parte localiza-se em países do hemisfério sul, ou seja, subdesenvolvidos (KJERFVE, 1994). O planejamento de utilização das lagoas, que ocupam cerca de 13% das áreas costeiras, tem sido feito com base no conhecimento de funcionamento de estuários (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). Esses fatos mostram a necessidade do estudo desse ecossistema nos países do hemisfério sul.

2.2 HIDRODINÂMICA EM LAGOS

Os principais agentes responsáveis pela circulação em corpos de água são: as marés, o escoamento superficial e subsuperficial, gradientes de densidade, oscilações no nível do mar, temperatura, radiação e vento (KJERFVE; MAGILL, 1989). No caso de corpos lagunares, o escoamento varia de acordo com suas dimensões, morfologia batimétrica e sua localização no globo, como mostram alguns estudos (LAIRD; KRISTOVICH; WALSH, 2002; LAIRD; WALSH, 2003; ANYAH; SEMAZZI, 2013) e explica Fragoso (2009); além da presença de afluentes e obstáculos, como estruturas vertedoras (DHI, 2014). Para Józsa (2006), o vento é o principal desses agentes para lagos raso, salvo exceções. Lagos costeiros são, portanto, sistemas físicos diversificados devido à circulação da massa de água e a variedade em seu tamanho e forma, suas características físicas interagem de forma complexa, gerando escoamentos que são considerados turbulentos para a maioria dos casos.

2.2.1 Ação do Vento em Lagos

A resposta do corpo d'água devido à atuação do vento é função da intensidade, direção e comprimento da pista de atuação, da ausência ou presença de estratificação e da geometria do lago. A quantificação destes fenômenos é feita através do cálculo da tensão de cisalhamento superficial do vento, dada por uma relação empírica, em termos da velocidade quadrática. A tensão superficial do vento (N/m^2) é calculada através da equação 1 (DHI, 2014):

$$\bar{\tau}_s = \rho_a c_d |\mathbf{u}_w| \bar{\mathbf{u}}_w \quad (1)$$

Onde ρ_a é a densidade do ar (kg/m^3), c_d é o coeficiente de arraste do ar (adimensional) e $\bar{\mathbf{u}}_w = (u_x, u_y)$ é a velocidade do vento (m/s) dez metros acima do nível do mar. A velocidade causada pela tensão do vento é dada pela equação 2:

$$U_{ts} = \sqrt{\frac{\rho_a c_d |\mathbf{u}_w|^2}{\rho}} \quad (2)$$

Onde ρ é a densidade da água (kg/m^3).

O coeficiente de arraste pode ser tanto constante ou dependente da velocidade do vento. A DHI (2014) sugere que variem de acordo com a intensidade do vento, como mostra o conjunto de equações 3.

$$c_d = \left\{ \begin{array}{ll} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} < w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{array} \right\} \quad (3)$$

Onde c_a , c_b , w_a e w_b são fatores empíricos e w_{10} é a velocidade do vento dez metros acima do nível do mar. Os valores utilizados neste trabalho são padrão e indicados nos manuais do modelo, em que, $w_a = 7$ m/s ; $w_b = 25$ m/s ; $c_a = 0,001255$, $c_b = 0,002425$.

2.2.1.1 Giros

As duas principais feições de circulação formadas em lagos são: giros e seiches. Os giros são movimentos circulatorios, estabelecidos

pelo vento ou outra força motora os quais detêm grande parte da energia dos agentes externos. Sua formação em lagos deve-se à atuação do vento em águas com profundidades e cisalhamento de fundo distintos (JI; JIN, 2016). Para compreender melhor este fenômeno toma-se como referência o perfil de um lago qualquer na Figura 1. O giro é formado pois há maior quantidade de massa de água na área esquerda, deslocando o centróide do sistema para este lado, o que cria um torque com a ação do vento sobre a superfície (Figura 1). Na parte mais rasa, a corrente tem a mesma direção do vento, sendo que esta retorna pela parte mais profunda, assumindo, portanto, direção contrária.

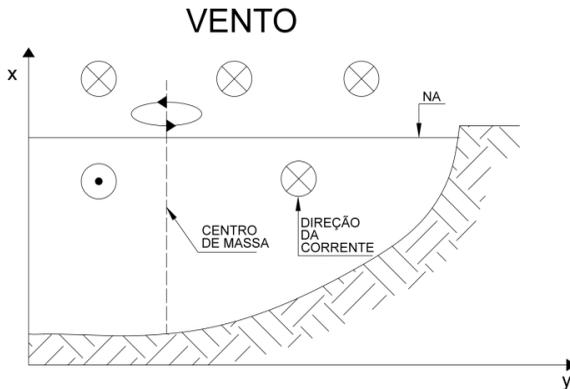


Figura 1 – Formação de Giro em Lagos. Adaptado de Ji e Jin (2016).

Onde:

⊗ é a direção da corrente gerada e/ou do vento aplicado para dentro do papel.

⊙ é a direção da corrente gerada pelo vento para fora do papel.

No hemisfério sul, os giros que tem sentido horário são chamados de ciclone e são convergentes, os anti-horário, anticiclone e são divergentes. Em contraste com os giros relativamente estáveis do oceano, a circulação em lagos é mais dependente das forças atmosféricas de curto período. Sistemas lacustres diferem-se dos oceânicos devido à persistência de suas correntes, onde sistemas

oceânicos são quase permanentes e lacustres podem variar em minutos ou horas (IMBODEN; WÜEST, 1995).

2.2.1.2 *Seiches*

Além da formação de giros, o vento induz diferenças no nível superficial da água em diferentes regiões de lagos e lagoas. Quando a atuação do vento cessa, ocorre um fenômeno chamado *seiching*, ou oscilação natural do corpo d'água. O *seiching* ocorre em qualquer corpo lagunar, aberto ou fechado, quando sofre algum estímulo externo, por exemplo: vento ou terremoto (DEAN; DALRYMPLE, 1984). Trata-se de um fenômeno que atua na mistura vertical da água de um lago, que garante a suspensão de nutrientes do fundo para a camada superficial, onde a luz solar está disponível para algas (JI; JIN, 2016).

Se imaginarmos um lago retangular com profundidade constante, em equilíbrio, sem forças externas, a superfície da água deve apresentar-se como mostra a Figura 2. Após ação do vento por determinado tempo, há elevação da superfície da água devido ao acúmulo de água em determinada região (Figura 2B). Se o vento cessa, a superfície da água oscila entre as posições C, D, A e B da figura 2, até que volte ao estado inicial. A perda de energia da onda ocorre devido ao atrito com o fundo do lago.

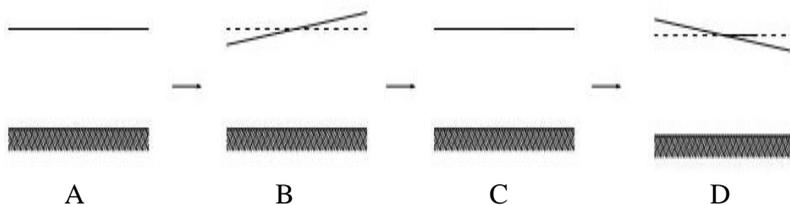


Figura 2 – Fenômeno de oscilação natural de um corpo d'água. Adaptado de Pereira (2010).

O seiche é uma onda estacionária caracterizada, portanto, por um comprimento de onda e período ou frequência. Ainda, em um lago retangular, pode-se imaginar que uma onda estacionária baterá em uma parede refletora e que voltará para seu estágio inicial em um tempo T , chamado período de oscilação. Para corpos de água rasos, é possível determinar o período de oscilação (T) através da equação 4 de Meridian:

$$T = \frac{2L}{n_h \sqrt{gh}} \quad (4)$$

Em que L é o comprimento da pista da superfície da água em que o vento atua (m); g é gravidade (m/s^2); h é a profundidade média do corpo d'água (m); T é o período de oscilação da onda estacionária (s), n_h é número de nós harmônicos (adimensional). O número de n_h varia de acordo com o harmônico em que a onda oscila. A Figura 3 mostra o valor de n_h , utilizado na fórmula de Meridian e o valor o comprimento da onda, representado na figura como l (m). Ao harmônico cujo $n_h=1$ chama-se de primeiro harmônico, ou harmônico fundamental, $n_h=2$ segundo harmônico.

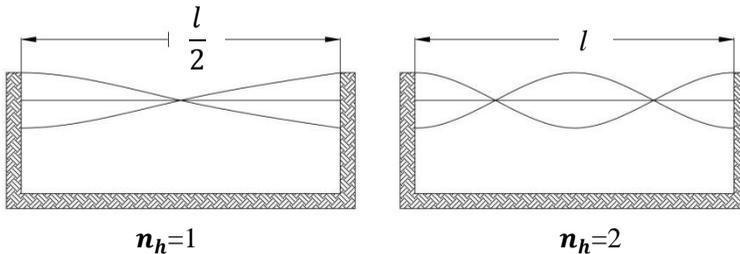


Figura 3 - Harmônicos de uma onda estacionária em um lago retangular. Adaptado de Dean e Dalrymple (1984)

2.2.1.3 Ação do vento sobre partículas

Os fenômenos de giro e seiche atuam na mistura das águas de um lago, na direção horizontal (giros), ao longo da coluna d'água (seiches), e, são responsáveis por grande parte do transporte de sedimentos, nutrientes e algas no lago (JI; JIN, 2016, BELETSKY, 1999).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (2003), o acúmulo de cianobactérias em determinada área de um lago é consequência de dois principais fatores: a profundidade do corpo d'água, pela qual a cianobactéria pode subir e descer, e pelo tamanho da pista de atuação em que o vento age através da superfície. O vento pode ser responsável pelo acúmulo de cianobactérias em determinadas épocas de crescimento desses microrganismos. Uma vez formada acumuladas, as cianobactérias podem levar um tempo longo para dispersar em corpos de água rasos, o

que ocasiona morte celular e liberação de material tóxico. A Figura 4 é um esquema que mostra como pode ocorrer o acúmulo de cianobactérias em determinada área devido à atuação do vento.

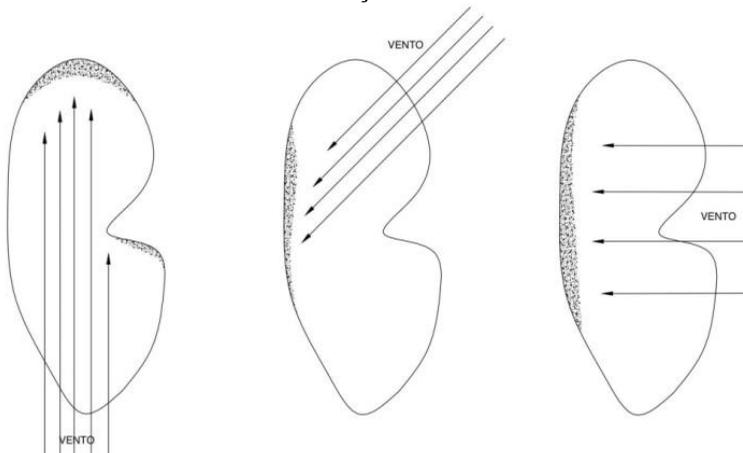


Figura 4 – Acúmulo de cianobactérias em determinadas regiões de um lago. Adaptado de OMS (2003).

Dependendo da distribuição na coluna d'água, o vento intenso também pode misturar esses microrganismos na coluna d'água (Figura 5). Assim, estimular-se-ia um maior crescimento, com consequente floração, como explica Wu et al. (2013). Fica evidente, portanto, que o conhecimento deste efeito no lago é de grande importância para a gestão desse ecossistema.

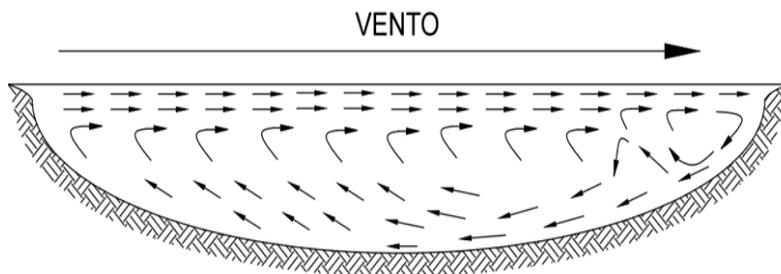


Figura 5 – Mistura da Coluna d'água em um lago provocada pela tensão de cisalhamento do vento na superfície. Adaptado de Kjerfve e Magill (1989).

2.3 RUGOSIDADE DE FUNDO

Contrariamente à ação do vento sobre a superfície de água, a rugosidade de fundo age sobre as camadas mais profundas, desacelerando-as. Conseqüentemente, um gradiente de velocidade é gerado ao longo da coluna d'água. A forma do perfil de velocidades, representado na Figura 6, depende da geometria do corpo de água e deve-se às tensões cisalhantes no fundo (PORTO, 2006). Sendo assim, apesar da informação da velocidade média ser de grande importância, deve-se entender que as velocidades das partículas da água no escoamento não estão uniformemente distribuídas.

Na Figura 6, a partícula de água em contato com o fundo tem velocidade nula, adjacente ao fundo está a subcamada de limite laminar, onde a flutuação da velocidade não atinge os mesmos valores que nas regiões mais distantes e apresenta variação praticamente linear à velocidade na direção principal do escoamento. Em seguida está uma camada de transição e, ocupando a maior parte, encontra-se a região turbulenta (PORTO, 2006).

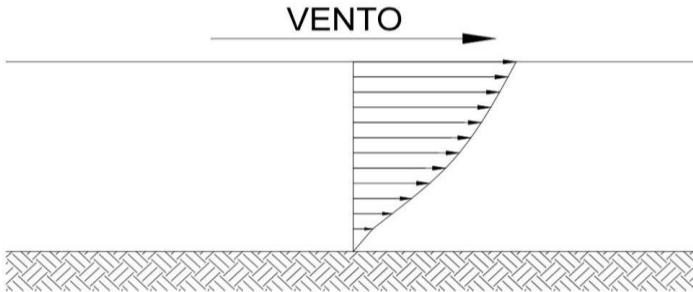


Figura 6 – Perfil simplificado de velocidade induzida pelo vento e reduzida pela rugosidade de fundo.

A tensão cisalhante de fundo representa a resistência ao escoamento e é apresentada nas equações da hidrodinâmica. Este valor depende dos sedimentos de fundo do corpo d'água em questão, e pode ser expresso por um coeficiente de resistência. Existem diferentes coeficientes de resistência ao escoamento: fator de fricção Darcy-Weisbach (f), Coeficiente de rugosidade absoluta (ϵ), Manning (n), Chezy (C) (ABBOTT; BASCO, 1989). Os coeficientes mais utilizados para definir o valor da tensão de cisalhamento são: Chezy e de Manning, que podem ser calculados através das seguintes equações 5 e 6:

$$C \cong 25,6 \left(\frac{R_h}{\varepsilon} \right)^{1/6} \quad (5)$$

$$n \cong 0,039 \varepsilon^{1/6} \quad (6)$$

Onde, $R_h = A_m/P_m$, e representa o raio hidráulico (m); A_m representa a área molhada da seção (m²), e P_m o perímetro molhado (m). Para corpos em que a componente horizontal é significativamente maior que a vertical, o raio hidráulico é aproximadamente igual à profundidade no local (MCDOWELL; O'CONNOR, 1977). Os valores do coeficiente de rugosidade absoluto (ε) são dados por Abbott e Basco (1989). Uma adaptação da figura a partir da qual se retiraram estes valores encontra-se no Apêndice A. A Tabela 1 apresenta os coeficientes de rugosidade absoluta e respectivo valor de coeficiente de Manning para os sedimentos de fundo da Lagoa do Peri, obtidos no estudo de Oliveira (2002). A Tabela 2 apresenta valores de coeficiente Chezy para alguns sedimentos e raio hidráulico.

Tabela 1 – Valores de Coeficiente de Rugosidade Absoluta e Manning para os Sedimentos da Lagoa do Peri

Sedimento	Cascalho	Areia	Silte	Argila
ε	0,020	0,030	0,015	0,007
n	0,020	0,022	0,019	0,017

Tabela 2 – Valores de Coeficiente de Chezy para algumas profundidades e sedimentos da Lagoa do Peri.

Sedimento	ε	Coeficiente de Chezy [m ^{1/2} /s]				
		Raio Hidráulico [h]				
		1	3	6	9	13
Cascalho	0,020	49,14	59,01	66,24	70,87	75,35
Areia	0,030	45,93	55,15	61,91	66,24	70,42
Silte	0,015	51,55	61,91	69,49	74,35	79,05
Argila	0,007	58,53	70,29	78,90	84,42	89,75

O coeficiente de Chezy, C , ou número de Manning, n , são utilizados para determinar o coeficiente de rugosidade de fundo do modelo hidrodinâmico, que, por sua vez, é utilizado no cálculo da tensão de fundo. Neste trabalho, utilizou-se do coeficiente de Chezy, C , para o qual o modelo MIKE21 utiliza equação 7 (DHI, 2014):

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad (7)$$

Onde c_f é o coeficiente de rugosidade de fundo do modelo hidrodinâmico. Definida a composição de sedimentos do fundo da lagoa, coeficiente de Chezy e coeficiente de rugosidade de fundo, pode-se determinar tensão cisalhante de fundo através da equação 8, que expressa a lei quadrática (DHI, 2014):

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho} = c_f \bar{u}_b |\bar{u}_b| \quad (8)$$

Onde $\bar{\tau}_b$ é a tensão de cisalhante de fundo (N/m^2) e \bar{u}_b é a velocidade de escoamento acima do fundo (m/s).

2.4 ENERGIA EM LAGOS

A energia contida nos lagos é decorrente de forças externas, que agem estimulando mecanismos de mistura de suas águas. É possível separá-las em duas principais: energia térmica e mecânica que inclui potencial (induzida pela mudança na densidade) e cinética (induzida pela ação do vento e vazão de rios afluentes). A Figura 7 mostra valores típicos de fluxos de energia (energia por unidade de área e tempo, W/m^2) e energia contida (energia por unidade de área, em J/m^2) para lagos.

A energia térmica é importante para lagos com estratificação significativa. Quantifica-se a partir da amplitude de energia, contida na diferença entre os valores máximos e mínimos de temperatura na coluna d'água. A energia cinética é considerada o menor termo na equação total de energia de um lago. Trata-se do termo que contém as correntes, ondas e movimento turbulento. O valor de energia cinética gerado pela ação do vento e entrada dos afluentes é menor que $10 J/m^2$, segundo Imboden e Wüest (1995). Neste trabalho não serão incluídos os fatores temperatura

e radiação. Portanto, será apresentada apenas a energia cinética deste sistema, decorrente da ação do vento e de seus afluentes.

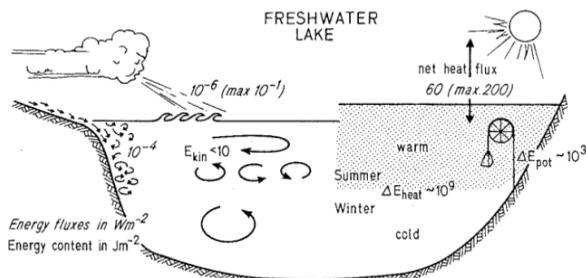


Figura 7 – Fluxo de energia e energia contida em lagos. Fonte: (IMBODEN; WÜEST, 1995)

A energia cinética contida em um lago pode ser calculada pela equação 9:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \rho V_l \frac{u_m^2}{2} \quad (9)$$

Onde u_m velocidade média da corrente na coluna d'água, magnitude (m/s), m é a massa (kg) e V_l é volume (m³).

2.5 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Modelos são uma tentativa de simplificar processos complexos da natureza. Através deles, representam-se relações entre variáveis, admitindo-se que a resposta a uma variação relaciona-se a um processo conhecido. A modelagem matemática é uma metodologia comumente aplicada em ecossistemas aquáticos para quantificação de processos, auxiliando nas etapas de análise e tomadas de decisão (ROSMAN, 1989; WOODROFFE, 2002; FRAGOSO, 2009b).

Modelos hidrodinâmicos são descritos por um conjunto de equações que representam a conservação das propriedades da água, discretizadas no tempo, sobre uma grade computacional, com o objetivo de analisar a quantidade de movimento da água em um domínio determinado. Devido à dificuldade em resolvê-las analiticamente, métodos computacionais evoluíram contribuindo para melhorar o entendimento dos escoamentos em detalhes (ABBOTT; BASCO, 1989).

Segundo Rosman (1989) os modelos hidrodinâmicos podem ser divididos em: tridimensionais, bidimensionais e unidimensionais. A escolha do modelo a ser utilizado, depende da qualidade da análise que se deseja, e, do investimento de tempo e recursos que se dispõe. Neste estudo, aplicou-se o modelo hidrodinâmico 2DH (bidimensional horizontal), disponibilizado pela *Danish Hydraulic Institute* (DHI) em um convênio com o Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

2.5.1 Modelo Numérico Hidrodinâmico para Águas Rasas

As equações que descrevem o movimento de um fluido incompressível são as equações de Navier-Stokes, baseadas em evidências físicas e experimentais. Nelas, assume-se que o fluido é newtoniano, ou seja, o fluido apresenta deformação por cisalhamento diretamente proporcional à tensão cisalhante aplicada e que a distribuição é hidrostática. Para solucionar este conjunto de equações utiliza-se da equação da conservação de massa (ABBOTT; BASCO, 1989).

Lagos, águas costeiras, baías e estuários, em sua maioria, podem ser classificados como corpos de águas rasas, ou seja, as escalas horizontais são muito maiores que as verticais, e, é possível considerar uma coluna de água bem misturada, em que possa desprezar a estratificação (ROSMAN, 1989). Para estudos de hidrodinâmica de corpos de águas rasas são adotados os modelos hidrodinâmicos bidimensionais horizontais (2DH), que fazem uso das equações 10, 11 e 12 (DHI, 2014). Estas equações são resultado da integração das equações de momento de Navier Stokes e da continuidade na direção z.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (10)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento, na direção x:

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} =$$

$$-gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (11)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento, na direção y:

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (12)$$

A variável h representa a profundidade total de água (m) e é composta por $h = \eta + d$; onde d é a profundidade remanescente de água (m) e η , elevação da superfície (m) (Figura 8). As velocidades nas direções x e y são representadas por \bar{u} e \bar{v} (m/s), respectivamente, e representam valores médios ao longo da coluna d'água, h .

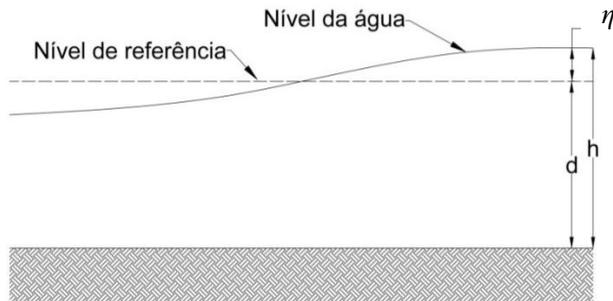


Figura 8 – Altura de água total (h), altura de água remanescente (d) e elevação da superfície (η). Adaptado de DHI (2014).

A magnitude da descarga devido às fontes pontuais é representada por S ; e u_s e v_s são a velocidade com que a água entra no corpo d'água nas direções x e y, respectivamente. Além disso, destacam-se os termos:

$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t}$: representa a aceleração local instantânea do escoamento em dada posição;

$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y}$: representa a aceleração advectiva do movimento em determinado instante;

$-gh \frac{\partial \eta}{\partial x}$: representa a variação do gradiente devido à declividade da superfície livre, na direção x. O escoamento é favorecido de regiões em que η é positivo para regiões em que η é negativo.

$-\frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x}$: representa variação do gradiente devido a variação na pressão atmosférica. O escoamento é favorecido para regiões a variação de p_a é negativa.

$-\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x}$: representa a variação do gradiente devido às diferenças de densidade. Este termo força o escoamento de lugares onde a água é mais densa para lugares onde a água é menos densa (ROSMAN, 1989).

As variáveis τ_{sx} e τ_{sy} representam a tensão de cisalhamento provocada pelo vento, enquanto τ_{bx} e τ_{by} representam a tensão de cisalhamento de fundo. Adaptou-se a equação original da DHI (2014) retirando-se algumas parcelas. O parâmetro f , da equação original, representa a influência da força de Coriolis, que neste caso pode ser desprezada devido às pequenas dimensões do lago.

A tensão lateral, ou tangencial, é representada pelos termos T_{xx} , T_{xy} , T_{yy} , inclui a tensão viscosa, tensão turbulenta e advecção diferencial, e é estimada utilizando a formulação de viscosidade turbulenta, baseada em gradientes de velocidades médios na coluna de água (DHI, 2014).

Segundo DHI (2014) as equações hidrodinâmicas, aqui apresentadas, utilizaram da proposta estatística de Reynolds, ou seja, representam o escoamento em termos médios temporais, e da hipótese de Boussinesq, segundo a qual as variações de densidade importantes são as que ocorrem no termo da força gravitacional (termos em que se multiplica a aceleração da gravidade) (PORTO, 2006; EIGER, 1989; MCDOWELL; O'CONNOR, 1977).

2.5.1.1 Malha Computacional, Condição de Contorno e Método de Discretização Espacial

O modelo hidrodinâmico utilizado foi desenvolvido para aplicações oceanográficas, costeiras e estuarinas e utiliza das equações apresentadas no item 2.5.1. A principal característica deste modelo é utilização do método de volumes finitos para solução das equações governantes. O domínio espacial é discretizado pela subdivisão do contínuo em elementos não sobrepostos, em que os elementos podem ser polígonos de formatos arbitrários. São mais comuns os elementos triangulares, como os da Figura 9, retirada de uma das malhas utilizadas neste estudo.

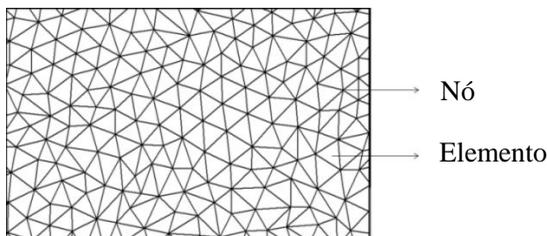


Figura 9 – Malha computacional. Detalhe de Nó e Elemento.

Nesta malha, cada triângulo representa um elemento. Para cada elemento obtém-se um dado de elevação da superfície e velocidade. Os nós são os vértices dos triângulos e contém a informação da batimetria.

O contorno do domínio é necessário para que as equações sejam resolvíveis. Existe a possibilidade de imposição de contornos abertos, normalmente representam estuários ou baías, onde se impõe o nível da água. Ainda, é possível optar pela condição de contorno com a terra. Neste caso, podem ser adicionadas entradas de rios ou canais através da imposição de vazões e velocidades. Não obstante, deve-se definir a condição de fundo através da batimetria e rugosidade, onde se impõe velocidade nula, e, superfície livre, prescrita pela tensão do vento (ROSMAN, 2015).

Para representação da solução da hidrodinâmica de um corpo d'água, existem duas alternativas. Primeiro através do método Euleriano de discretização, onde a massa d'água é representada de forma contínua na malha computacional. Ou seja, a evolução da propriedade é dada no tempo, em todos os pontos de escoamento, relativos a um sistema de coordenadas fixo. E, através do método Lagrangeano, onde a massa no sistema é dividida em um número de partículas com coordenadas

especificadas, que são marcadas ao longo do escoamento. Este método representa o transporte das partículas de acordo com o escoamento no sistema, já calculado previamente, ou simultaneamente, adicionando-se dispersão através da introdução de um termo de aleatoriedade (DHI, 2014).

Em sistemas com escoamento turbulento, a dispersão consiste em dois processos: a difusão molecular e a dispersão turbulenta, sendo esta última dominante. A difusão turbulenta tem grande importância em corpos d'água naturais. Para o coeficiente de dispersão, D , adotou-se o valor padrão sugerido pelo modelo: $0,01 \text{ m}^2/\text{s}$. Em simulações costeiras é importante distinguir entre dispersão horizontal e vertical. Neste caso, modelagem em águas rasas, é coerente adotar-se apenas o coeficiente de dispersão horizontal. Para modelos bidimensionais devem ser utilizados o perfil de rugosidade de fundo, logarítmico neste caso, e o perfil de velocidade induzido pelo vento. Para este último, calcula-se um vetor que é multiplicado pela velocidade média da coluna d'água, chamado coeficiente de arraste c_w , apresentado na Figura 10 e calculado pela equação (13).

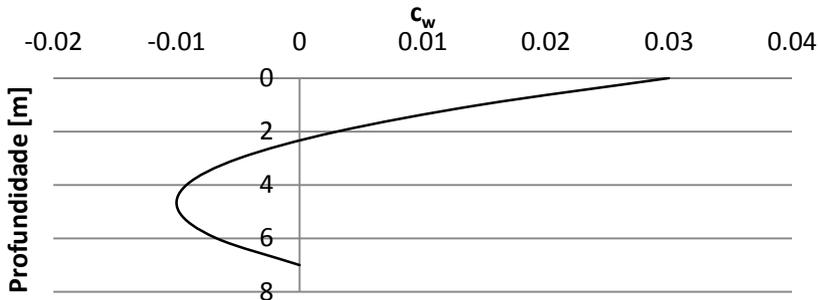


Figura 10 – Coeficiente de arraste para a coluna d'água de um elemento cuja profundidade é de 7 metros e coeficiente de arraste de entrada é de $0,03$. Adaptado de (DHI, 2014).

$$c_w = c_w^* \left(1 - 3 \frac{z_0}{h}\right) \left(1 - \frac{z_0}{h}\right) \quad (13)$$

Onde c_w^* é o coeficiente de arraste de entrada do módulo de transporte de partículas (adimensional) z_0 é a cota da partícula em relação ao nível do mar (m), h altura da coluna d'água local (m).

2.5.1.2 Escala e Estabilidade de um Modelo Hidrodinâmico

A circulação em corpos de água pode ser estudada em diversas escalas de tempo e espaço (KJERFVE; MAGILL, 1989). Em pequena escala, a velocidade das moléculas apresentam intensas perturbações, em uma escala maior, a velocidade apresenta caráter mais consistente, com menores variações. Entender o movimento da água em escala molecular não é usual; na prática, costuma-se analisar a circulação na menor escala macroscópica aceitável para a aplicação prevista (ABBOTT; BASCO, 1989).

Quando é possível associar uma velocidade a uma partícula para uma dada escala, diz-se que o movimento é resolvível, também conhecido como movimento advectivo. Os movimentos difusivos são aqueles aos quais não é possível determinar uma taxa de mudança relativa da posição, trata-se de um movimento em escala menor que a mínima de interesse. Pelo Teorema de Nyquist, sabe-se que, para um movimento ser resolvível, um fenômeno tem que ter dimensões pelo menos duas vezes maior que a menor escala de interesse (ROSMAN, 2015). No caso de modelos hidrodinâmicos, a velocidade com que a informação se propaga no modelo, c_{model} , deve ser pelo menos duas vezes mais rápida que a velocidade com que uma onda se propaga em água rasa, c_{onda} . Sendo c_{model} e c_{onda} o resultado das equações 14 e 15:

Velocidade no modelo:

$$c_{model} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (14)$$

Velocidade da onda:

$$c_{onda} = \sqrt{gh} \quad (15)$$

Onde Δx e Δt são parcelas infinitesimais de espaço (m) na direção x e tempo (s), respectivamente. Essa condição é rearranjada de maneira a resultar na conhecida condição de estabilidade Courant Friedrich-Lévy (CFL), ou número de Courant. No modelo utilizado neste estudo, este parâmetro é calculado a partir da equação 16 (DHI, 2014):

$$CFL = (\sqrt{gh} + |\mathbf{u}|) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |\mathbf{v}|) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (16)$$

Além disso, o tempo de simulação de um modelo, bem como a qualidade de seus resultados, pode ser controlado pela ordem de grandeza da solução numérica que é escolhida. Grades computacionais com elementos de menores implicam em maior tempo de computação, no entanto, resultam em soluções mais detalhadas. Para garantir-se a

estabilidade, o valor de CFL deve ser menor que um, sendo o valor ideal aconselhado pela DHI (2014) de 0,8. Sendo assim, após definir-se a malha em que será trabalhada, obtém-se um intervalo de tempo mínimo de integração, que garante um CFL menor que 0,8. O tempo mínimo é calculado a partir da equação 17:

$$d_{tmin} = \frac{1}{2} \cdot \frac{CFL \cdot l_e}{\sqrt{9,8h}} \quad (17)$$

Em que l_e é o menor comprimento do elemento analisado (m). O modelo MIKE21 apresenta o tempo de integração limitante da malha definida. O usuário deve ajustar a malha de forma que se obtenham intervalos mínimos similares, para aperfeiçoar os cálculos no modelo.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO: LAGOA DO PERI

A Lagoa do Peri localiza-se na costa sudeste de Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina, região sul do Brasil, entre os paralelos: 27°43'00" e 27°45'00" de latitude Sul e entre 48°30'30" e 48°32'30" de longitude Oeste (Figura 11).

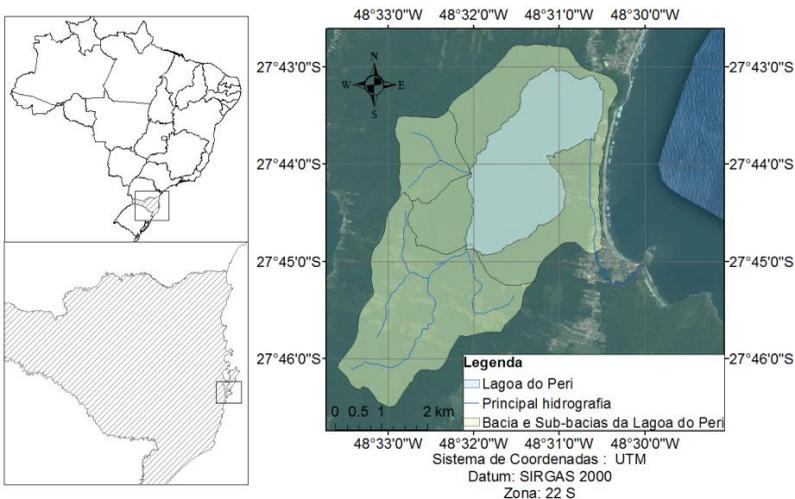


Figura 11 – Localização da Lagoa do Peri, detalhe da Bacia da Lagoa do Peri e Sub-bacias da Hidrografia principal.

A área da Bacia Hidrográfica do Peri compreende uma área de 20,12 km² e delimita o Parque Municipal da Lagoa do Peri. Os principais mananciais da Bacia da Lagoa do Peri são os rios Cachoeira Grande e Ribeirão Grande situados no sul e oeste na Figura 11, cujas bacias apresentam área de 7,17 km² e 1,61 km² respectivamente (PENTEADO, 2002, TEIVE; LISBOA; PETRUCIO, 2008).

Segundo Teive; Lisboa e Petrucio (2008), apesar de desconhecer-se ao certo o padrão de circulação da Lagoa do Peri, afirma-se que a ação do vento, associada à pequena profundidade, impossibilita o processo de estratificação deste corpo d'água. No entanto, Laudares-Silva (1999) encontrou as menores e maiores temperaturas da água registradas para a Lagoa do Peri: 15°C e 30°C, o que evidencia a ocorrência de pequenas estratificações térmicas, com variações de até 2°C entre superfície e fundo, em seu estudo realizado entre março de 1996 e fevereiro de 1997. Sendo assim, considerou-se que a Lagoa do Peri apresenta estratificações leves em determinadas épocas do ano. No entanto, sua aproximação para corpo d'água não estratificado, ou pouco estratificado, é válida, visto que a profundidade é pequena se comparada a corpos bem estratificados, a intensidade do vento incidente é alta e a intensidade da radiação solar não deve garantir a estratificação durante maior parte do ano.

A composição geológica da Bacia da Lagoa do Peri na região oeste é granítica, com granulações bastante variáveis. No delta do Rio Cachoeira Grande há sedimentos mal selecionados transportados através de fluxos torrenciais nas encostas das elevações. A região leste, em torno da Lagoa do Peri é composta por depósito marinho lagunar, com sedimentos arenosos de textura variada em forma de praias e cristas lagunares; e, na região das praias, depósito eólico com sedimentos arenosos finos (HORN; LIVI, 2015). Os sedimentos que formam o fundo do corpo d'água da Lagoa do Peri foram estudados por Oliveira (2002). Observa-se o predomínio de sedimentos arenosos no lado leste do lago, variando entre areias finas e médias; no centro-oeste há predomínio de sedimentos siltosos e sedimentos grânulo-arenosos na região sudoeste, próximo à foz do Rio Cachoeira Grande. Esses dados foram utilizados para o cálculo dos coeficientes de rugosidade (item 3.2.4).

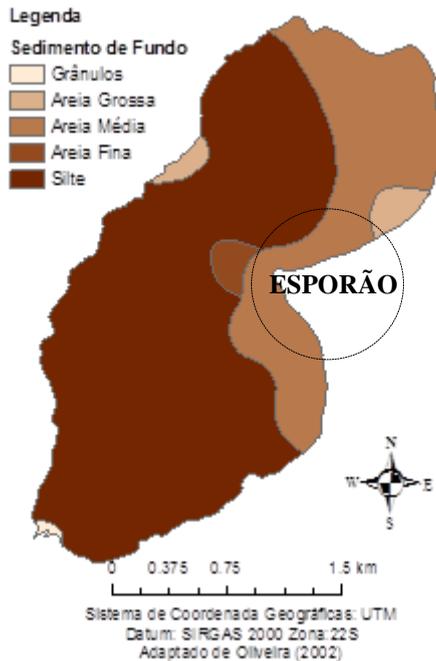


Figura 12 - Sedimentos de Fundo da Lagoa do Peri e localização do esporão.

3.2 DADOS DE ENTRADA

3.2.1 Dados Meteorológicos

Este estudo usou de 12 simulações com ventos constantes no tempo, para as diferentes simulações variaram-se as características de direção e intensidade. As características escolhidas para os ventos aplicados foram baseadas em estudos da região litorânea de Santa Catarina e em dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Souza e Schettini (2014) estudaram a hidrodinâmica da Baía Tijucas, com forçantes de vento e maré. O cenário de vento utilizado foi uma série temporal de vento criada, com nordeste de intensidade de 3 m/s atuando durante 5 dias, seguido por um giro de 12 horas, e entrada do vento sudeste constante de 8 m/s de intensidade por 2 dias. O estudo de Rodrigues, Franco e Sugahara (2004) conclui que as frentes frias atingem a região litorânea de Santa Catarina, em média, três a quatro

vezes ao mês com intervalos de oito dias, no qual se considerou como frente fria a permanência do vento sul por ao menos um dia, e, queda da temperatura. A média sazonal da intensidade do vento durante a passagem da frente fria apresentada, fica, em média, de 4 m/s (3,7 m/s para dezembro, janeiro e fevereiro, 3,6 m/s para março, abril e maio, 4,1 m/s para junho, julho e agosto e 4,6 m/s para setembro, outubro e novembro), no dia da passagem da frente fria. Os principais ventos são: norte, atuando antes e durante a passagem da frente fria, e o sul, atuando durante e depois, ambos com intensidade semelhante.

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza as normais climatológicas de Florianópolis, calculadas para o período de 1961 a 1990. A direção de vento predominante é norte, sendo a intensidade normal climatológica anual de 3,2 m/s. Os meses de maior intensidade são os meses de outubro, novembro e dezembro, com normais de 3,8 m/s, 3,9 m/s e 3,8 m/s, respectivamente, todos com direção predominante de vento norte.

Com estas informações e observando-se o relevo da bacia em torno da Lagoa do Peri, que impede a entrada de ventos oeste e norte diretamente devido à cadeia montanhosa que compõe sua bacia hidrográfica, optou-se por aplicar os ventos nordeste e sul com intensidades de 4 e 8 m/s. A direção do vento é referenciada no modelo em relação ao norte verdadeiro através do ângulo θ ($^{\circ}$), no sentido horário (Figura 13).

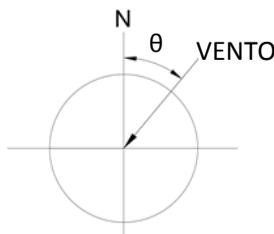


Figura 13 – Referência para direção do vento. Adaptado de DHI (2014).

3.2.2 Batimetria Real

Os dados utilizados para gerar os pontos que formam o fundo do da Lagoa do Peri no modelo hidrodinâmico foram: a batimetria de JRNOVO (2014), e, os pontos de altimetria extraídos do modelo numérico de terreno (MNT) da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável (SDS). Os dados batimétricos foram cedidos pela CASAN (JRNOVO, 2014), o levantamento foi feito de

agosto a outubro de 2013 pela empresa JRNOVO Serviços Técnicos Ltda. Trata-se de 6654 pontos batimétricos, referenciados horizontalmente no Sistema de Coordenadas UTM e Datum Horizontal SAD1969 UTM 22S. A batimetria possui referência vertical no nível da água médio medido durante o levantamento batimétrico, de 2,38 metros. O dado de altimetria consiste em um MNT gerado a partir de ortofotos da Secretaria do Estado de Desenvolvimento Sustentável (SDS), entre maio de 2010 e outubro de 2011, com resolução de 0,30 m. A empresa Engemap gerou o modelo numérico de terreno a partir desses dados com pixels de 1metro.

Os pontos de altimetria foram unidos aos batimétricos de forma que fosse possível representar coerentemente a área alagável (região que é em princípio seca, porém pode vir a ser molhada dependendo do escoamento no lago). Para unir estes dados, provenientes de diferentes fontes, fez-se necessário o ajuste da referência vertical e horizontal. Para o ajuste vertical, somou-se aos dados batimétricos (valores negativos) o valor de 2,38 m. A Figura 14 apresenta um esquema para ilustrar o ajuste vertical, onde z_0 é a nova cota da superfície da água, com referencial no nível do mar (e vale 2,38 m, neste caso); b é o valor de batimetria inicial, cujo módulo é igual à profundidade do lago; e z_f é a cota com referencial no fundo, utilizada para gerar os gráficos de área e volume e $H_{m\acute{a}x}$ é a altura máxima da coluna d'água no lago (13,23 m).

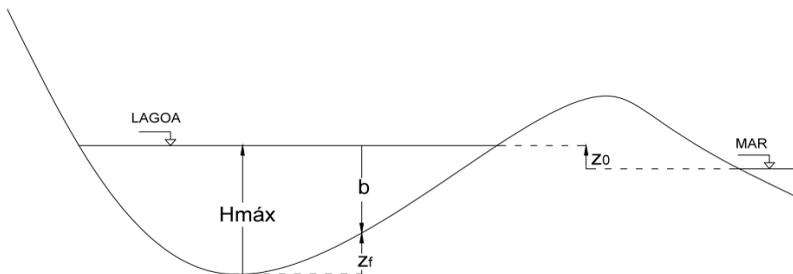


Figura 14 – Ajuste dos dados de batimetria para cotas em relação ao mar e ao fundo da Lagoa.

Para ajuste horizontal, os dados batimétricos foram projetados do Datum SAD1969 para SIRGAS2000 enquanto os dados de MNT, de WGS84 para SIRGAS2000, ambos em UTM Zona 22 S. Após união dos dados, gerou-se um modelo numérico deste terreno com células de 15 metros, cujos pontos extraídos foram entrada para o modelo hidrodinâmico.

Para construir as batimetrias simplificadas baseando-se nas características físicas da Lagoa do Peri, foram estudados três itens que influenciam diretamente em sua hidrodinâmica: profundidade, área e volume. A Figura 15 apresenta a distribuição das profundidades na Lagoa do Peri. Os pontos nela representados foram utilizados como pontos de observação durante as simulações, para garantir a qualidade dos resultados. Entre estes, os pontos de coleta 1 e 2 baseiam-se nos trabalhos de Tonetta (2012), no qual analisaram-se dados de qualidade da água.

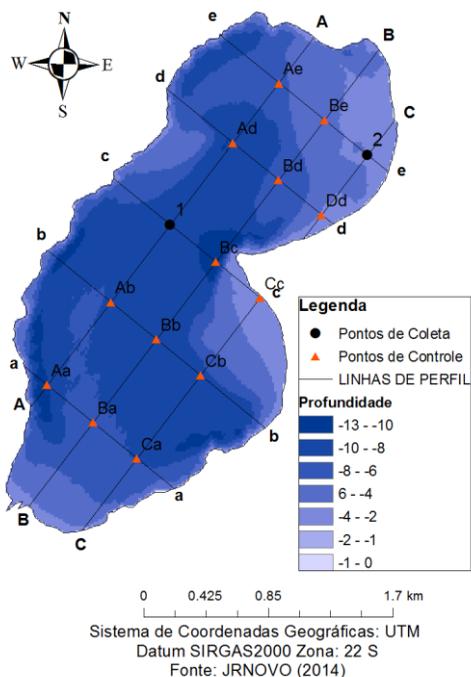
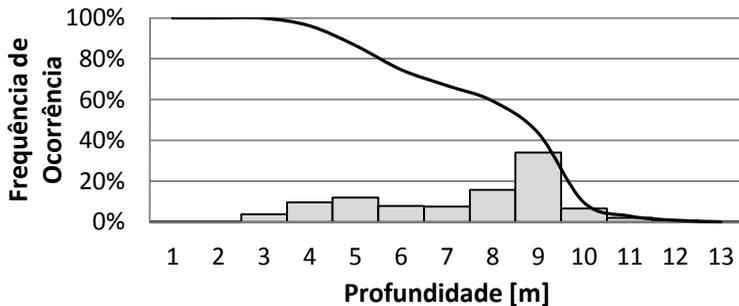


Figura 15 – Profundidade, perfis e pontos de observação na Lagoa do Peri.

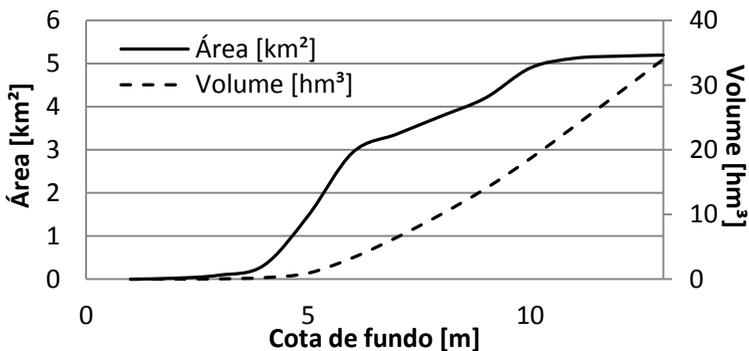
A profundidade dos pontos de observação é apresentada na Tabela 3 e os perfis estão no Apêndice B. A Figura 16 mostra o histograma de profundidade da Lagoa do Peri, considerando nível da água de 2,38 metros acima do nível do mar. A profundidade mais frequente é de 9 metros, enquanto que, a média é de 6,96 metros.

Tabela 3 – Profundidade dos pontos de observação.

Ponto	Profundidade [m]	Ponto	Profundidade [m]	Ponto	Profundidade [m]
1	6,25	Ae	4,99	Ba	5,34
2	1,34	Be	1,97	Ca	5,76
Aa	7,79	Bd	5,34	Cb	6,16
Ab	5,71	Bc	9,35	Cc	0,24
Ad	7,51	Bb	6,26	Dd	1,47

**Figura 16** – Histograma de Profundidade e Histograma de Profundidade Acumulado da Lagoa do Peri.

A Figura 17 apresenta as curvas de área e volume em função da cota de fundo, z_f , da Lagoa do Peri. Os dados de área e volume foram obtidos através do software ArcGIS. A área superficial da Lagoa do Peri, quando está a 2,38 metros acima do nível do mar é de 5,07 km², e seu volume, 35 hm³.

**Figura 17** – Gráfico da Área e Volume em função da cota de fundo da Lagoa do Peri.

3.2.3 Batimetria Simplificada

Para iniciar os estudos da Lagoa do Peri, optou-se pela utilização de lagos com batimetrias simplificadas, e dessa forma, compreender os processos e parâmetros mais influentes na circulação. Utiliza-se de simplificações quando se deseja obter respostas mais genéricas, analisar a influência da batimetria no escoamento, ou ainda, analisar a influência de forças isoladas como o vento. Os estudos de Annyah e Semazzi (2009) e Laird, Walsh e Kristovich (2003) utilizaram de batimetrias simplificadas durante as simulações hidrodinâmicas, cuja força atuante na superfície foi o vento. Estudos de corpos simplificados são importantes, pois, podem auxiliar através da extrapolação de resultados de circulação, como formação de giros, no entendimento de corpos mais complexos, como são os reais.

Para que os resultados possam ser comparados aos reais, são necessários alguns requisitos para a formação de uma batimetria simplificada. Primeiramente, a geometria que mais se adequa à deste lago é de uma elipse, que pode ser determinada pela equação (18):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 0 \quad (18)$$

Em que, a é o comprimento máximo no eixo x , e b é o comprimento máximo no eixo y . Sendo assim, a equação da elipse que melhor representa a Lagoa do Peri é a equação (19):

$$\frac{x^2}{4^2} + \frac{y^2}{1,6^2} = 0 \quad (19)$$

No entanto, a Lagoa do Peri apresenta um esporão na região central, que pode influenciar em sua circulação. Portanto, foram geradas duas batimetrias, representadas na Figura 19 (A e B), chamadas de: elíptica (e), em A, e triangular (t), em B, na qual se adicionou um triângulo na região do esporão da lagoa, na tentativa representa-lo. A largura máxima da elipse foi ajustada de forma que se mantivesse a área superficial similar a real, visto que esta é a interface de atuação do vento no lago. As Figura 18 e Figura 19 mostram as batimetrias simplificadas desenvolvidas, baseando-se nas dimensões máximas da Lagoa do Peri,

como largura, comprimento e profundidade máximos, e dados e volume e área, que estão apresentadas na Tabela 4.

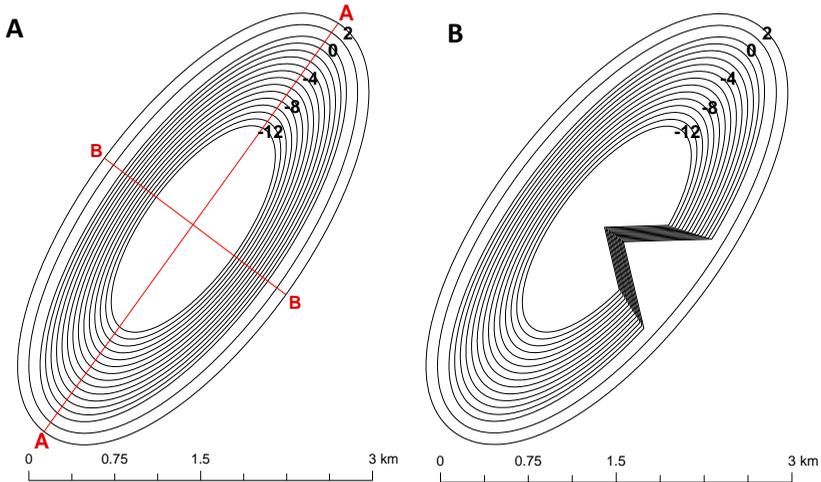


Figura 18 - A - Curvas de Nível da batimetria *e*. B – Curvas de Nível da batimetria *t*

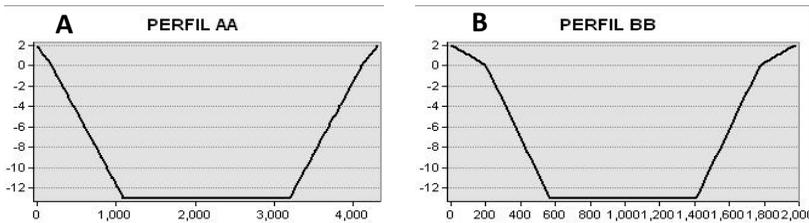


Figura 19 – A – Perfil AA (A) B – Perfil BB (A). O eixo x representa a batimetria (m) e o eixo y, a distância (m) ao longo do perfil.

Tabela 4 – Características das batimetrias simplificadas *e* e *t*, e, real *r*.

Característica	Batimetria		
	<i>r</i>	<i>e</i>	<i>t</i>
Largura da lagoa no estrangulamento [km]	0,95	-	0,97
Comprimento Máximo [km]	4,0	4,0	4,0
Profundidade Máxima [m]	13,0	13,0	13,0
Área Superficial [km ²]	5,07	5,02	4,87
Volume [hm ³]	35,74	38,33	35,48
Rotação do eixo longitudinal [°]	38	38	38

3.2.4 Coeficientes de rugosidade na Lagoa do Peri

A partir dos dados apresentados no Apêndice A, tabela adaptada de Abbott e Basco (1989), atribuíram-se valores de coeficiente de rugosidade absoluto para cada um dos sedimentos encontrados na Lagoa do Peri por Oliveira (2002). Calculou-se um valor ponderado de rugosidade absoluta, para cada ponto, como mostra a equação 20:

$$\varepsilon_{final} = \varepsilon_{areia} \cdot \%_{areia} + \varepsilon_{cascalho} \cdot \%_{cascalho} + \varepsilon_{silte} \cdot \%_{silte} + \varepsilon_{argila} \cdot \%_{argila} \quad (20)$$

Os valores de coeficiente de rugosidade absoluto foram interpolados e, posteriormente, extraídos para os pontos de batimetria CASAN (2014). Assim, para cada ponto obteve-se um valor de coeficiente de rugosidade absoluto e raio hidráulico, possibilitando o cálculo do coeficiente de Chezy.

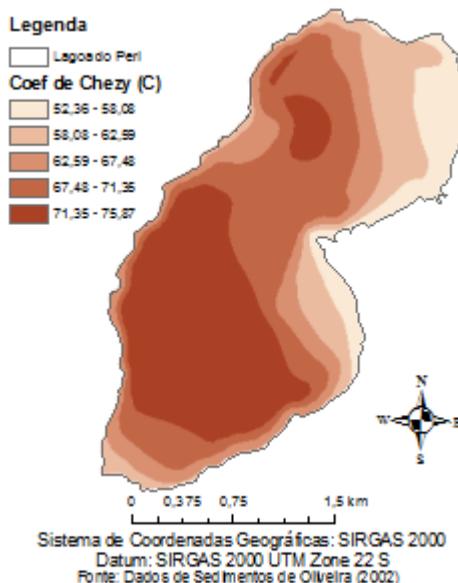


Figura 20 – Distribuição dos Coeficientes de Chezy ($m^{1/2}/s$) para Lagoa do Peri

Os pontos de distribuição dos coeficientes de Chezy foram entrada para as simulações das quais se utilizou a batimetria real. A partir desses dados foi possível calcular a média do Coeficiente de Chezy na Lagoa do Peri, que é de $65,7 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, valor utilizado para as batimetrias simplificadas.

Os métodos de interpolação utilizados foram escolhidos de acordo com a confiabilidade e tempo de computação. O método *kriging* suaviza a superfície, o que pode diminuir erros locais de medição. Trata-se de um método mais complexo e amplamente utilizado, por isso foi escolhido para interpolar os dados de rugosidade. Quanto se trata do tempo de computação para interpolação, no entanto, este método pode ser lento para um grande número de pontos. Por isso, para os dados de batimetria e altimetria utilizou-se interpolação triangular.

A Figura 21 apresenta o fluxograma do pré-processamento dos dados para entrada no modelo hidrodinâmico.

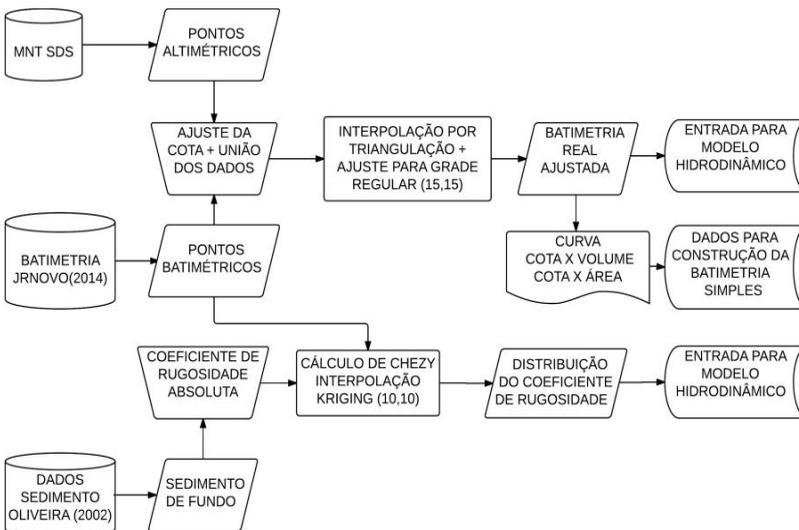


Figura 21 – Fluxograma do pré-processamento de dados de entrada do modelo.

3.3 PARÂMETROS INTERNOS AO MODELO HIDRODINÂMICO

A escolha da malha computacional está relacionada com a estabilidade do modelo, interfere diretamente no tempo de simulação e

na qualidade dos resultados obtidos. Por isso, a escolha da grade é um passo importante no processo. Diversos testes e simulações foram feitos até que se chegasse ao tamanho das malhas utilizadas: a malha da batimetria ideal tem 2614 nós e 4748 elementos, enquanto a malha da batimetria real tem 2789 nós e 5031 elementos. As malhas finais estão nos Apêndices C e D. O tempo de simulação para 15 dias de simulação levou, em média, 12 horas para as batimetrias e e t , enquanto para r , supera 20 horas, para o módulo hidrodinâmico e hidrodinâmico acoplado ao transporte de partículas. Para os demais parâmetros foram utilizados os valores padrão do modelo. Como método de integração no tempo, a opção escolhida foi *higher order* (mais demorado, porém mais preciso). O coeficiente de arraste, c_d , é variável de acordo com a intensidade do vento. E, fez-se necessário ativar o cálculo de alagamento e secagem de elementos, para evitar instabilidades no modelo, utilizando-se, também, dos valores padrão do modelo.

2.2.2 Transporte de partículas e seus parâmetros

Com intuito de investigar a mistura da massa de água superficial e o movimento de partículas nela contidas, foi incluído o módulo de transporte de partículas para as simulações na batimetria r . Neste módulo, utiliza-se o método de discretização Lagrangeano. Dividiu-se o lago em oito regiões de cores distintas para observar a mistura da massa no sentido leste-oeste e norte-sul. A distribuição das partículas é feita aleatoriamente pelo modelo, sendo que é possível determinar o número de partículas e a espessura da camada na qual elas se distribuem.

Através de testes, observou-se o efeito da espessura e localização da camada de distribuição das partículas na coluna d'água. Por isso, optou-se por apresentar os resultados em camadas distintas. Determinaram-se duas camadas de dispersão das partículas do modelo baseando-se em um estudo de WHO (2000), que apresenta dois estados de alerta para lagos que tem presença de cianobactérias: um para risco moderado, onde as cianobactérias estão dispersas nos quatro primeiros metros da coluna d'água e outro para risco alto, no qual se acumulam em quatro centímetros de altura. A escolha da espessura das camadas em que se distribuíram as partículas baseou-se em Tonetta, Silva e Petrucio (2014) onde se apresenta que a zona eufótica situa-se entre 2,4 e 3,6 metros de profundidade. Além disso, Hennemann e Petrucio (2010) afirmam que a altura da profundidade secchi é de 1,0 metro de profundidade. O cenário de risco alto foi definido para partículas distribuídas no primeiro metro e

o cenário de risco moderado, em 3,6 metros de espessura (Figura 22). O fluxo adotado foi de 100 kg/s, o coeficiente de dispersão horizontal adotado foi de 0,01 m²/s e a deriva adotada inclui o resultado hidrodinâmico, no qual se aplicou o perfil de velocidade. Foram desprezadas a dispersão vertical e a sedimentação.

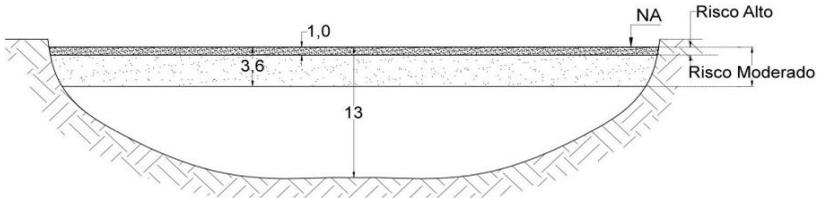


Figura 22 – Espessura das camadas de distribuição das partículas e sua classificação de acordo com o risco que representam.

3.4 TESTE COM VAZÕES

Para entender qual seria a resposta do modelo às vazões afluentes e associadas ao vento, neste lago, foram simulados dois casos com entradas de vazão na hidrografia principal. Devido à ausência de dados de vazão dos rios da Lagoa do Peri, foram utilizadas informações dos dados de vazão captada pela CASAN, que afirmam que a vazão média captada da Lagoa do Peri é de 200 l/s (CASAN, 2016). Deseja-se que o nível do lago não varie devido ao acúmulo ou perda de água, portanto a vazão de entrada deve ser igual à de saída. Além disso, as vazões aplicadas devem ser constantes para que se chegue a um estado próximo ao equilíbrio dinâmico e a corrente gerada possa ser comparada à corrente gerada pelo do vento. Considerando-se que os principais tributários são os dois cursos d'água Rio Ribeirão Grande e Rio Cachoeira Grande, calculou-se a vazão de cada curso d'água proporcionalmente às áreas de suas bacias hidrográficas. Dessa forma, garantiu-se que o nível não fosse alterado pela entrada de água (equação 21).

$$200 \frac{l}{s} = \frac{A_1 \times Q_{e1} + A_2 \times Q_{e2}}{A_1 + A_2} \quad (21)$$

Foram adotadas, portanto: $Q_{e1} = 163 \text{ l/s}$ e $Q_{e2} = 37 \text{ l/s}$, chamadas de vazão base. Para verificar o efeito do aumento da vazão foi feita uma simulação com o dobro dos valores da vazão base, chamadas

vazão enchente: $Q_{e1} = 327 \text{ l/s}$, $Q_{e2} = 73 \text{ l/s}$, cuja soma é 400 l/s , vazão afluyente no canal Sangradouro.

3.5 SIMULAÇÕES

As simulações realizadas utilizaram de entrada de vazão, vento e batimetrias distintas. Dessa forma, foi possível avaliar a influência do vento na circulação quando comparada à vazão. As simulações de vento foram escolhidas de forma que se pudesse avaliar a influência da variação das características do vento na circulação. A Tabela 5 apresenta estas simulações, as características de suas forçantes, e os módulos utilizados. Para os módulos, H representa o hidrodinâmico e PT o transporte de partículas. Em todas as simulações houve um período de aquecimento do modelo de 15 dias, de forma que não fossem geradas ondas de perturbação. Esta foi a condição inicial para as simulações, que duraram mais 15 dias. Os dados apresentados são referentes ao último intervalo de tempo, onde se assumiu que o modelo estava próximo à condição de equilíbrio dinâmico. A condição inicial para o módulo de transporte de partículas foi o resultado módulo hidrodinâmico, o qual foi simulado paralelamente ao hidrodinâmico, por mais 10 dias. A Figura 23 sintetiza este estudo.

Tabela 5 - Cenários Simulados

Simulação	Vazão	Vento		Batimetria	Módulo
		θ [°]	u_w [m/s]		
1	Base	-	-	t	H
2	Enchente	-	-	t	H
3	Base	-	-	r	H
4	Base	22	4	t	H
5	-	22	4	t	H
6	-	22	4	e	H
7	-	22	8	t	H
8	-	22	4	r	H e PT
9	-	38	4	t	H
10	-	180	4	t	H
11	-	180	8	t	H
12	-	180	4	r	H e PT

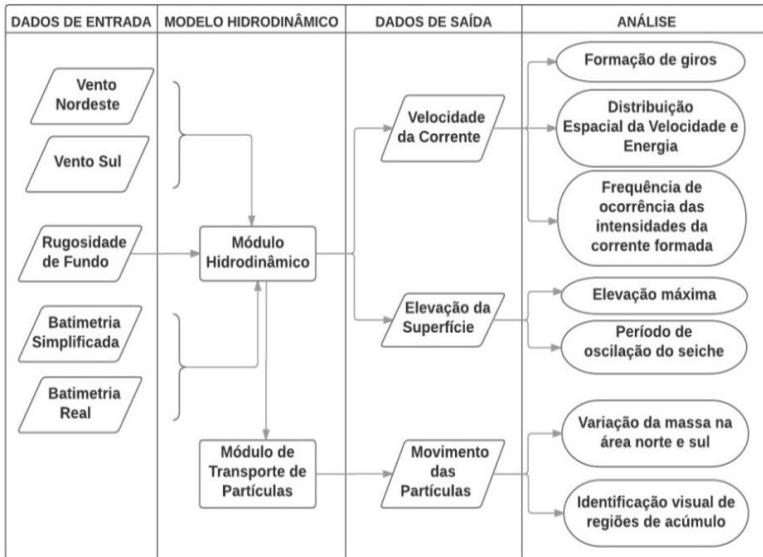


Figura 23 - Fluxograma Síntese do Estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, apresenta-se o teste feito com entrada da vazão dos rios afluentes e sangradouro e estas entradas associadas à aplicação de vento constante. Em seguida, avaliam-se os resultados das simulações de 1 a 12. Para facilitar a comparação, em cada item, tomou-se um resultado como referência, para o qual se definiu a velocidade como V_R e a energia, E_R . Fez-se necessário a utilização do programa SURFER devido à dificuldade encontrada no pós-processamento de dados através do MIKE21. A grade regular formada pelo SURFER a partir dos dados de saída do MIKE21 é regular de 50 metros. Por fim, apresentam-se as simulações de transporte de partículas realizadas na batimetria r , para ventos constantes, e o fluxo para algumas seções do lago.

4.1 RESPOSTA À VAZÃO ASSOCIADA AO VENTO

A Figura 24 apresenta o campo de velocidades nas batimetrias t (A) e real r (B) obtido através das simulações 1 e 3.

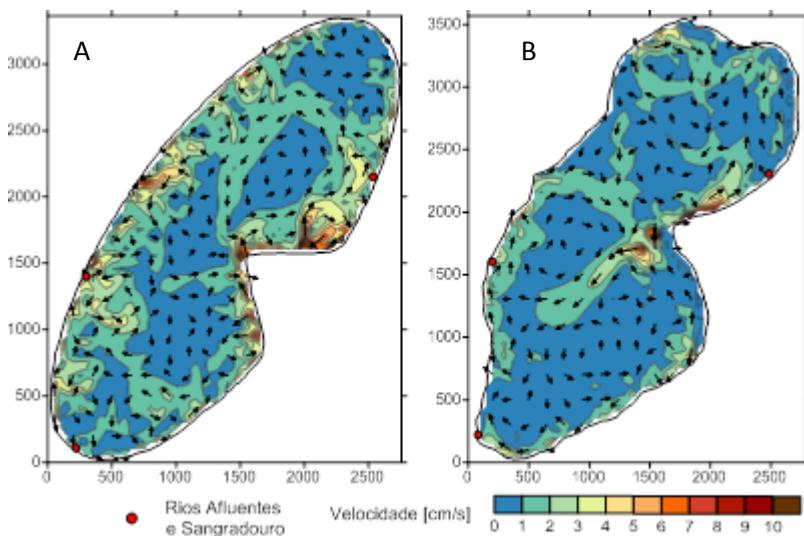


Figura 24 – Circulação nas batimetrias t (A) e r (B) gerada pela vazão base nos rios afluentes e canal sangradouro. Simulações 1 e 3 (os locais de entrada e saídas de vazão estão destacadas pelo círculo vermelho).

Observa-se que não há semelhança na circulação final para as batimetrias t e r . Em (A) forma-se um giro anticiclone na parte norte do lago, acima do esporão, e um pequeno giro anticiclone na parte inferior (coordenadas 500, 1250). Em (B) não são observados giros na parte superior, apenas uma tendência à circulação no sentido anti-horário na ao leste (na parte rasa). Há formação de dois giros de sentidos contrários na parte inferior do lago. A intensidade da corrente formada mostrou-se mais elevada apenas na região estreita. A Tabela 6 apresenta os resultados em termos de velocidade média de campo. Toma-se como referência a simulação 1 (V_R , E_R), em que aplicou-se o cenário de vazão base na batimetria t .

Tabela 6 – Velocidade Média da simulação 1, 2 e 3.

Batimetria / Vazão	Velocidade Média [cm/s]	Relação V/V_R
t / Base	1,56	-
e / Enchente	1,67	1,06
r / Base	1,26	0,76

Observa-se que, uma elevação 100% (aplicação da vazão enchente) no cenário de vazão base aumentou a velocidade média no corpo d'água em apenas 6% V_R . A batimetria r apresenta velocidade média inferior à batimetria t (diferença de 24% V_R).

A Figura 25 apresenta a relação entre as velocidades e energia cinética das simulações 1 e 2, com intuito de compreender espacialmente o que ocorre ao elevar-se a vazão. À esquerda apresenta-se a relação entre os resultados de velocidade da corrente e à direita, os valores de energia cinética nas áreas de giros, destacados por retângulos. A simulação referência é a simulação 1 (V_R e E_R) e a simulação 2 é representada por V e E . Os resultados são apresentados em termos de $\log_{10} \frac{V}{V_R}$ e $\log_{10} \frac{E}{E_R}$, para que a distribuição dos valores fosse apresentada de maneira mais adequada. Assim, para valores iguais a zero, V é igual a V_R . Para valores positivos, a velocidade aumentou e negativos, diminuiu. Valores maiores que 0,5 indicam que V chega à $3V_R$.

A região destacada pelo retângulo (1), onde se formou o giro anticiclone, apresenta relações de 30% V_R ($\log_{10} \frac{V}{V_R} < -0,5$) a $3V_R$. A energia, nesta área, atinge valores acima de $10E_R$, e a direção da corrente formada não apresenta alterações na formação do giro. Ainda Figura 25, na região de giro 2, em destaque, a velocidade diminuiu. A velocidade da corrente gerada pela vazão enchente (V) é menor que

30% V_R . A energia diminui para até 1% V_R e a direção apresenta alterações, de forma que não forma-se o giro anticiclone.

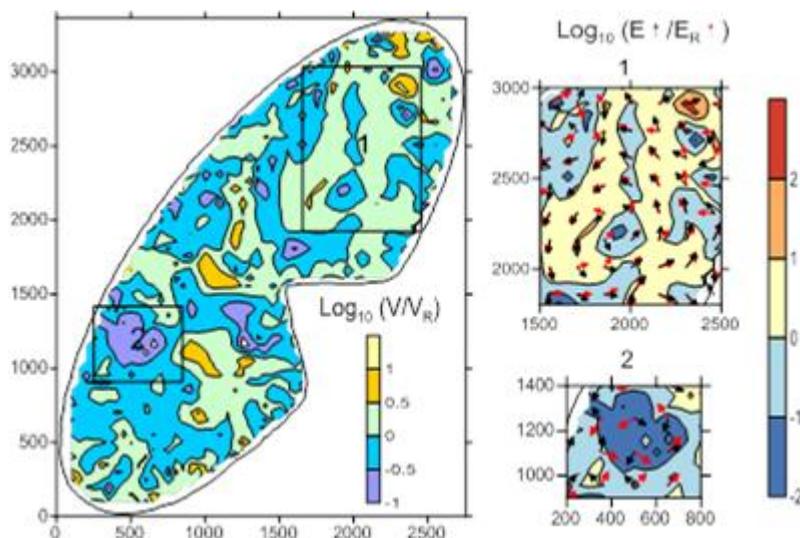


Figura 25 – Relação entre as velocidades geradas pelas simulações 1 (Vazão Base) e 2 (Vazão Enchente), à esquerda. Detalhes da relação da Energia Cinética nos giros anticiclones gerados na parte superior (1) e inferior (2), à direita.

Ao introduzir-se a forçante vento (simulação 4) ao final da simulação com vazão base (simulação 1 – após 15 dias), houve um aumento de 123% na velocidade média da corrente (1,67 cm/s para 3,71 cm/s). Enquanto que, a velocidade média da simulação forçada apenas com vento e sem vazão (simulação 5), difere em menos de 1% daquela simulada com vento e vazão base (simulação 4). Ou seja, o vento atuou mais efetivamente no aumento da intensidade da corrente em relação à vazão. A distribuição e frequência das velocidades obtidas nas simulações 1, 2, 4 e 5 estão apresentadas na Figura 26, onde se verifica a semelhança entre os resultados das simulações 1 e 2 e entre as simulações 4 e 5. Isso indica que, para essas grandezas de vazão e vento, a vazão dos rios afluentes não deve ser principal o motor da circulação deste lago. Este resultado está de acordo com Jozsá (2006), que afirma que o vento é ser o principal agente responsável pela mistura da água em lagos. No entanto, para que isso fosse confirmado seria necessário um estudo das vazões afluentes neste lago, visto que este valor foi adotado

baseando-se apenas na vazão captada pela CASAN (explicado no item 3.4). Além disso, aqui se despreza o movimento causado pela diferença na densidade das águas, diferença na temperatura, e, a energia potencial associada a esses processos. Em momentos em que a velocidade do vento atuando sobre a superfície do lago é muito pequena, a vazão dos afluentes deve comandar a circulação do lago, resultando em velocidades baixas dentro do corpo d'água.

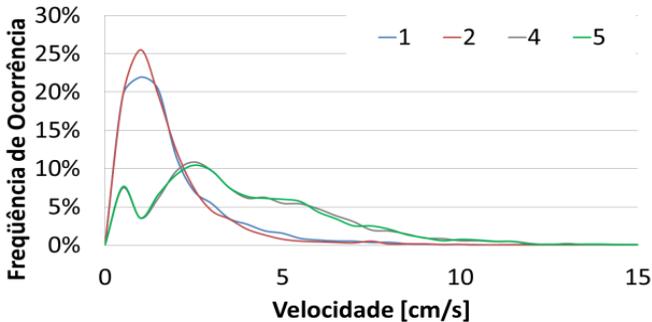


Figura 26 – Histograma de velocidades das simulações: 1 (Vazão Base), 2 (Vazão Enchente), 4 (Vazão Base e Vento $\theta=22^\circ$ e $u_w=4\text{m/s}$) e 5 (Vento $\theta=22^\circ$ e $u_w=4\text{m/s}$).

4.2 O EFEITO DA BATIMETRIA

A profundidade e a linha de costa são características que influenciam na direção das correntes formadas em lagos. As correntes aceleram, desaceleram e mudam de direção em diferentes profundidades, formando giros. Para compreender este efeito neste estudo apresenta-se a Figura 27 com os resultados de velocidade obtidos com diferentes batimetrias e mesma forçante, vento nordeste ($\theta=22^\circ$ e $i=4\text{m/s}$, simulações 5, 6 e 8).

O padrão de circulação apresentado pela batimetria *e* (Figura 27A), onde há formação de dois giros de sentidos opostos induzido pela ação de vento constante, é relatada por outros autores (BENNET,1974; JÓZSA, 2006). Em estudo no Lago Victoria, na Tanzânia, Annyah e Semazzi (2009) mostram os dois giros ao comparar batimetria real com uma simplificada e elíptica, e mostram que as mesmas feições foram observadas em ambas. No presente estudo, a batimetria simplificada *e* de dimensões menores e com rugosidade de fundo apresentou resultados

semelhantes aos descritos pela literatura. Para os demais resultados obtidos, aponta-se:

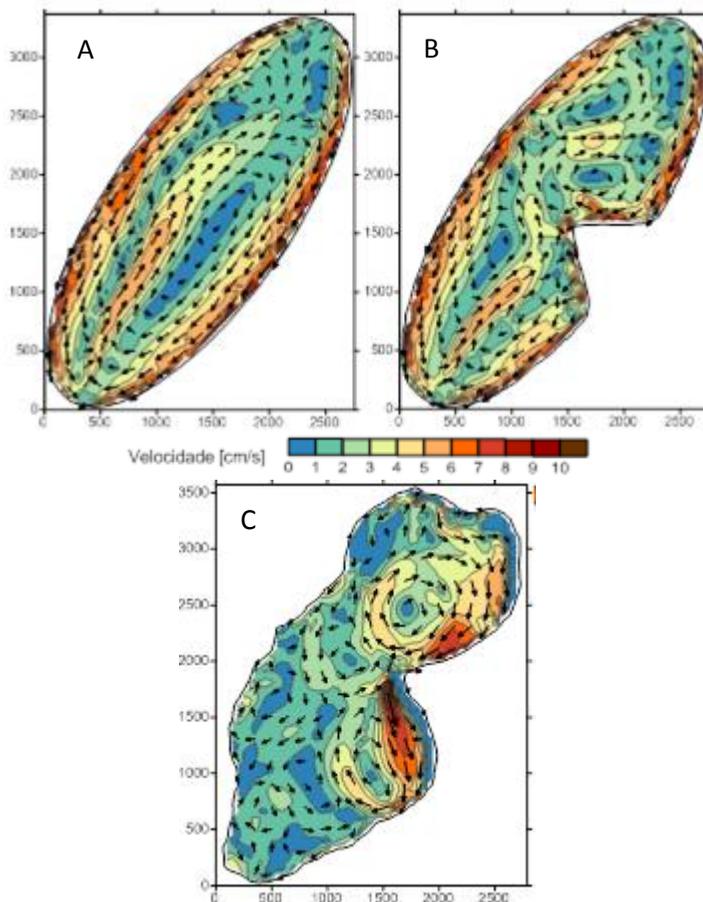


Figura 27 – Circulação com Forçantes de Vento Nordeste, nas batimetrias *e* (A - simulação 6), *t* (B – simulação 5) e *r* (C - simulação 8).

- A diferença entre a circulação de A e C, que resulta da simplificação demasiada do modelo, e conseqüentemente, não representa as características básicas da circulação desejadas. Portanto, a batimetria *e* apresenta limitações na representação das feições da Lagoa do Peri.

- A semelhança na circulação do lago nas Figura 27 B e C representada pelos giros ciclone ao norte e sul do esporão. A batimetria *t* apresenta, parcialmente, as feições observadas no lago real. Observou-se que ao oeste a representação fica mais limitada, em *t* atinge-se valores mais elevados de velocidade e são formados giros anticiclone que não se formam em *r*.

Os resultados obtidos a partir da aplicação do vento sul nas batimetrias *t* e *r* (simulações 9 e 11, respectivamente) também foram semelhantes entre si. Verifica-se, portanto, que o esporão localizado no centro do lago é um aspecto físico que determina sua circulação. Divide a circulação em parte norte e sul, e separa a formação de giros. Destaca-se a presença do giro ciclone ao norte das batimetrias *t* e *r*.

Com relação à intensidade da velocidade no lago, observa-se a semelhança entre as batimetrias *e* e *t*, que apresentaram velocidades elevadas nas áreas rasas. A batimetria *r*, por outro lado, apresenta intensidade inferior a 3 m/s na maior parte do lago e apenas na área ao leste superaram 4 m/s, local de profundidade menores. A Tabela 7 apresenta a velocidade média tomando-se como referência os resultados obtidos em *t* (Simulação 4).

Tabela 7 - Velocidade Média das simulações 5, 6 e 8.

Batimetria	Velocidade Média [cm/s]	Relação V/V_R
<i>t</i>	3,70	-
<i>e</i>	3,95	1,07
<i>r</i>	2,25	0,61

A velocidade média difere apenas em 7% entre as batimetrias *e* e *t*. Enquanto que a batimetria *r* apresentou velocidade média equivalente a 61% V_R . Isso pode indicar que a presença do esporão triangular tem pouca influência na atenuação da intensidade das velocidades. Portanto, esta resposta pode ser efeito da irregularidade do fundo presente na batimetria real, ou da variação nos coeficientes de rugosidade ao longo do lago. Deste ponto em diante, optou-se por utilizar a batimetria *t* para avaliar os demais resultados referentes à variação das características do vento, pois, além de apresentar tempo de simulação menor que a batimetria *r* (possui menos elementos na malha) e resultados satisfatórios para as finalidades deste estudo com relação a representação da batimetria *r* em comparação à batimetria *e*.

4.3 EFEITO DA VARIAÇÃO NA DIREÇÃO VENTO

Além da batimetria, outro fator que define a direção das correntes formadas em um lago é a direção do vento. Para entender a influência na variação desta característica do vento, foram aplicados os ventos nordeste $\theta=22^\circ$ (vento mais frequente) e $\theta=38^\circ$ (paralelo a linha de maior comprimento do lago) e sul $\theta=180^\circ$ (direção de ventos mais intensos). O resultado das simulações 8 e 9 são apresentados na Figura 28 A e B.

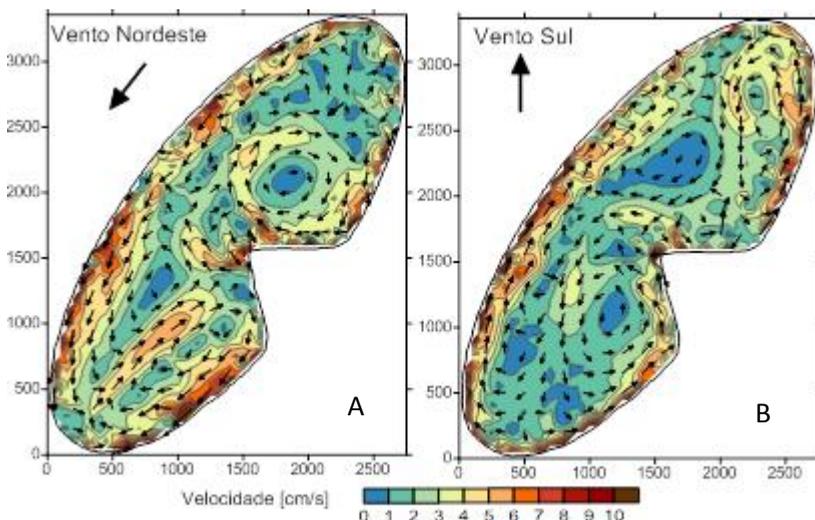


Figura 28 – Circulação gerada nas simulações 9 (A - $\theta=38^\circ$, $u_w=4\text{m/s}$) e 10 (B - $\theta=180^\circ$, $u_w=4\text{m/s}$).

De forma geral, a circulação ocorre da maneira descrita pela literatura: nas regiões rasas a água corre mais rapidamente no sentido vento, retornando na região central, mais profunda. Observa-se que o esporão divide o lago na formação de giros para as duas direções de vento. Na Figura 28 A, atua o vento nordeste com direção de 38° , paralelo à inclinação do lago. Novamente, observa-se a formação do giro ciclone na parte norte do lago. Outros dois giros de sentidos opostos são formados na porção inferior do lago. A circulação é semelhante àquela formada pelo vento $\theta=22^\circ$ (Figura 28A). Diferem apenas na região norte do lago, onde, com vento nordeste $\theta=22^\circ$, formaram-se dois giros de sentidos opostos bem definidos, e, com $\theta=38^\circ$, o giro ciclone atinge maiores dimensões, enquanto que o giro anticiclone diminui e

desloca-se para noroeste. Durante a atuação do vento sul (Figura 28 B) também é observado giro ciclone ao norte, deslocado para oeste. Ao sul do lago, há formação de um giro anticiclone, que também foi observado na batimetria r .

Esses resultados indicam que a variação na direção do vento altera a dimensão dos giros, a intensidade da corrente que os compõem, deslocando-os. A Tabela 8 apresenta a velocidade média da corrente formada. Tendo como referência o vento nordeste $\theta=22^\circ$ (V_R , E_R), a velocidade média para o vento nordeste atuando à 38° , decaiu em 2%, e, para o vento sul 8%.

Tabela 8 – Velocidade Média para os cenários de Vento Nordeste e Sul. Simulações 9 e 10.

Vento	Velocidade Média [cm/s]	V/V_R
$\theta=38^\circ$ e $u_w=4\text{m/s}$	3,64	0,98
$\theta=180^\circ$ e $u_w=4\text{m/s}$	3,43	0,92

A Figura 29 mostra a relação entre a intensidade da corrente formada pelo vento sul e a formada pelo vento nordeste ($\theta=22^\circ$), referência nesta análise (V_R e E_R). Foram detalhadas nos recortes 1 e 2 as regiões de giros. No detalhe 1, destaca-se o giro ciclone formado pelo vento nordeste na parte norte do lago, e, em 2, o giro anticiclone formado pelo vento sul, na parte sul do lago.

A razão $\log_{10} \frac{V}{V_R}$ predominante na área é de -0,5 a 0,5, o que significa que a corrente gerada pelo vento sul (V) varia de 30% V_R a 3 V_R na maior parte do lago. As áreas em que V é maior que 3 V_R são centro de giros formados pelo vento nordeste, onde passam correntes intensas, formadas pelo vento sul. A Figura 29 (1) mostra que E atinge valores acima de 100 E_R no centro do giro ciclone, formado pelo vento nordeste. As áreas em que V é inferior a 30% V_R , por outro lado, são centro dos giros formados pelo vento sul. A região onde a E atinge menores valores, 0,1% E_R , se localiza o centro do giro ciclone formado pelo vento sul. O detalhe 2 mostra a parte sul do lago onde as grandezas entre razões mostraram-se semelhantes à 1. Trata-se da região onde forma-se o giro anticiclone com a atuação do vento sul e onde passa uma corrente com intensidade elevada com a atuação do vento nordeste, por isso atinge grandezas de 0,1% E_R .

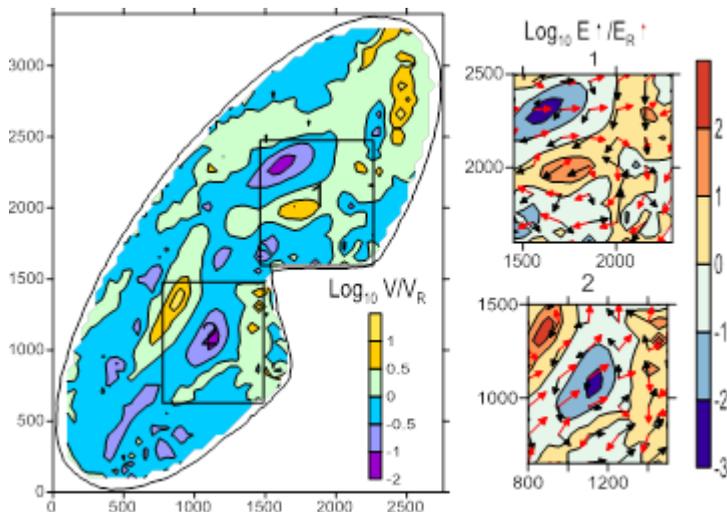


Figura 29 – Relação entre a velocidade obtida através das simulações 5 ($\theta = 22^\circ$, $u_w = 4\text{m/s}$) e 10 ($\theta = 180^\circ$, $u_w = 4\text{m/s}$), à esquerda. Detalhe (1) da direção da corrente e energia na região do giro ciclone, formado pelo vento nordeste, à direita. (2) Detalhe da direção da corrente e energia na região do giro anticiclone, formado pelo vento sul, à direita.

Os histogramas apresentados na Figura 30 mostram que a frequência de ocorrência de velocidade da corrente é semelhante para as diferentes direções aplicadas. Isso indica que a direção do vento deve alterar a distribuição da intensidade da corrente no espaço, mantendo, no entanto, os valores que elas assumem.

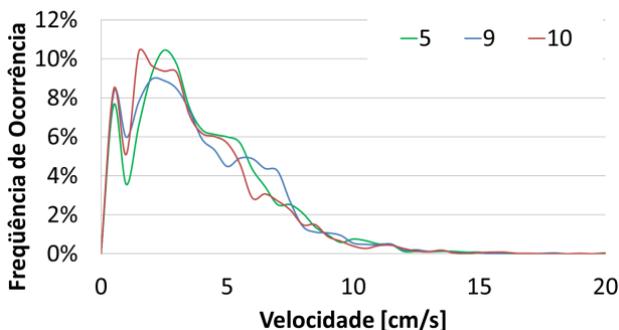


Figura 30 – Histograma das Velocidades das simulações: 5 ($\theta = 22^\circ$, $i = 4\text{m/s}$), 9 ($\theta = 38^\circ$, $u_w = 4\text{m/s}$) e 10 ($\theta = 180^\circ$, $u_w = 4\text{m/s}$).

4.4 A VARIAÇÃO NA INTENSIDADE DO VENTO

Como apresentado no item 2.2.1 a tensão do vento sobre a água é função quadrática da intensidade do vento. Para entender este processo, aplicou-se vento sul com intensidades de 4 e 8 m/s. Os resultados de circulação apresentaram mesmas feições para ambas circulações. Tomando-se como referência o vento sul atuando à 4m/s (V_R , E_R) apresenta-se a Figura 31.

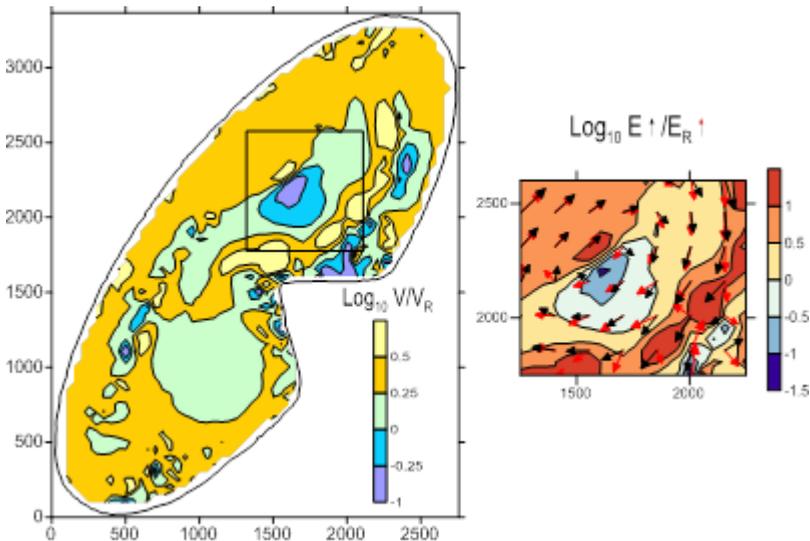


Figura 31 – Relação entre a velocidade obtida através das simulações 10 ($\theta = 180^\circ$, $u_w = 4\text{m/s}$) e 11 ($\theta = 180^\circ$, $u_w = 8\text{m/s}$), à esquerda. Detalhe da direção da corrente e energia na região do giro ciclone, à direita.

O intervalo de valores predominante da razão $\log_{10} \frac{V}{V_R}$ na área do lago é de 0 a 0,5. Isso significa que, na maior parte do lago, o valor da corrente formada pelo vento sul a 8 m/s é superior a V_R . A região em amarelo mostra a área em que V está acima de $1,78V_R$ ($\log_{10} \frac{V}{V_R} > 0,25$). O detalhe à esquerda, na Figura 31, apresenta a região do giro ciclone formado pelo vento sul na parte norte do lago, onde a variação da intensidade mostra-se mais significativa. Observa-se que E apresenta valores acima de $10E_R$, nas regiões distantes do centro, e, inferiores a

10% E_R , nas regiões centrais. Ainda no detalhe, observa-se que pouca alterações na direção da corrente em comparação à obtida no item 4.3.

A velocidade média da corrente aumentou em 108% V_R (de 3,43 cm/s com vento sul de intensidade de 4 m/s para 7,14 cm/s com vento sul de intensidade de 8 m/s). A Figura 32 apresenta a frequência de ocorrência da intensidade das correntes formadas para as diferentes intensidades de vento aplicadas. Observa-se que, ao variar a intensidade do vento há alteração na frequência de ocorrência da velocidade da corrente formada. A curva de vento sul atuando com 4 m/s apresenta maiores frequências de ocorrência até 6 cm/s. Neste ponto, as curvas de frequência cruzam-se e a curva do vento sul com intensidade de 8m/s atinge valores maiores.

Esses resultados mostraram que ventos intensos não alteraram a formação de giros. Entretanto, aumentaram a média da velocidade no lago, e alteraram a frequência de ocorrência destas. Especialmente, a razão a velocidade e energia dos cenários comparados atingiram grandezas inferiores àquelas apresentadas pela variação da direção do vento. Isto pode indicar que alterações na direção tem potencial maior em alterar a energia deste sistema em comparação à alteração na intensidade do vento.

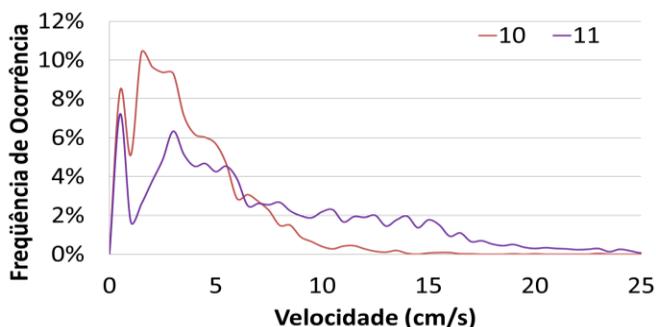


Figura 32 – Histograma das Velocidades das simulações 10 ($\theta = 180^\circ$ e $u_w = 4\text{m/s}$) e 11 ($\theta = 180^\circ$ e $u_w = 8\text{m/s}$).

4.5 ENERGIA CONTIDA E POTÊNCIA DO VENTO

O cálculo da energia contida é importante para entender se o ambiente apresenta perturbações significativas para alterar a dominância dos microrganismos que o habitam. Em caso negativo, segundo Baptista e Nixdorf (2014), a circulação no lago é próxima a permanente e gera

um ambiente com baixo nível de perturbação, o que colabora para a dominância da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii*.

Para entender este processo no lago estudado, apresenta-se a Tabela 9, com valores da energia cinética total contida, calculada de acordo com a equação 10. O resultado final é a soma do resultado obtido para cada elemento da malha, através da aplicação da equação 10. Os resultados apresentaram valores abaixo 10 J/m² para quase todas as simulações, valor indicado por Imbodem e Wüest (1995) (item 2.4, Figura 7), exceto para o vento nordeste com velocidade de 8 m/s. O menor valor de energia cinética contida, para as simulações de vento na batimetria *t*, foi de 2,79 J/m² (simulação 9), e, maior, de 13,63 J/m² (simulação 7). Uma possível justificativa para esse resultado seria o fato do vento nordeste 22 atuar em uma pista maior de vento (em relação ao vento sul), com menor influência do esporão (em comparação ao vento nordeste 38). Os ventos de mesma intensidade e direções diferentes apresentaram valores semelhantes, enquanto que, para intensidade de 8 m/s a energia aumentou de quatro a três vezes (das simulações 5, 9 para 11). Observa-se que para batimetria *t* o vento nordeste apresentou maior energia e velocidade média, enquanto que para batimetria *r* o vento sul apresentou maiores valores. A diferença entre os resultados das simulações para as diferentes batimetrias foram de, 13% E_R (simulações 5 e 8) e 9% E_R (simulações 10 e 12), tomando-se como referência o resultado da batimetria *t*. Esses valores são simplificações, visto que foram aplicados ventos constantes e batimetrias simplificadas, no entanto, espera-se que, para um cenário real, a energia apresente valores nesta faixa e varie nesta ordem de grandeza, sendo válidos para uma aproximação inicial.

Tabela 9 – Energia Contida para as simulações com vento

Simulação	θ [°]	u_w [m/s]	Batimetria	Energia contida [J/m ²]
5	22	4	<i>t</i>	3,32
7	22	8	<i>t</i>	13,63
8	22	4	<i>r</i>	2,09
9	38	4	<i>t</i>	3,12
10	180	4	<i>t</i>	2,79
11	180	8	<i>t</i>	9,56
12	180	4	<i>r</i>	2,53

4.6 ELEVAÇÃO NA SUPERFÍCIE DA ÁGUA E O SEICHE

Por fim, analisou-se a elevação da superfície do lago. A Figura 33 mostra a diferença de nível causada pela atuação dos ventos constantes sul à 8m/s e nordeste ($\theta=38^\circ$) à 4m/s. A atuação do vento nordeste, paralela ao maior comprimento do lago idealizado, provoca elevações na extremidade sul. O vento sul, por sua vez, causa elevações de nível na porção norte, que se estendem no sentido leste-oeste do lago. A ordem de grandeza é de milímetros, sendo que na maior parte do lago esta varia, no máximo, décimos de milímetros. A elevação máxima apresentada pelo vento nordeste a 4 m/s é de 5,37 milímetros. Para o vento sul de 8 m/s, obteve-se valor máximo de 6,26 milímetros. A batimetria r apresentou resultados semelhantes com elevação máxima de 2 mm em relação ao nível inicial e máxima diferença de 6 mm entre o nível mais alto e o mais baixo. Estes valores baixos devem-se às pequenas dimensões da área superficial do lago e mostram que este fenômeno não é expressivo neste corpo d'água. Portanto, não deve ser responsável pela mistura da coluna d'água, tão pouco, pode armazenar energia potencial significativa neste sistema.

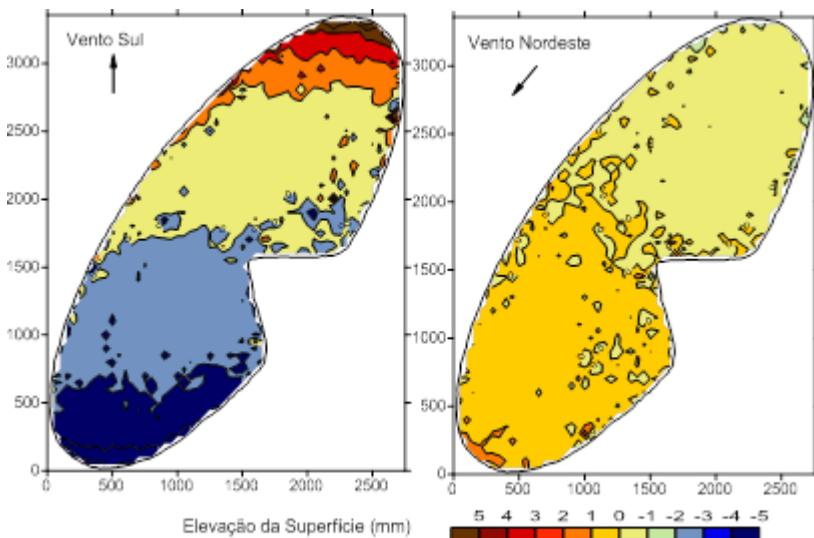


Figura 33 – Diferença de nível da superfície da água causada pela atuação dos ventos: (A) Vento Sul a 8 m/s e (B) Vento Nordeste 38° 4 m/s.

A partir da condição de equilíbrio dinâmico com forçante de vento sul constante de 8m/s, cessou-se o vento. Dessa forma foi possível calcular o período de oscilação fundamental deste lago. Os dados de elevação da superfície de todos os pontos de observação mostram que a oscilação encontra-se em harmônico fundamental. Calculou-se o período fundamental de oscilação deste lago através da fórmula de Meridian:

$$Tt = \frac{2L}{n\sqrt{gh}} = \frac{2 \times 4000}{1\sqrt{9,81 \times 7,76}} = 15,28 \text{ min}$$

O resultado analítico é próximo ao resultado modelado para a batimetria t e para a batimetria r ($Tr = 16$ minutos). Na Figura 34 temos a elevação da superfície após cessar-se o vento para os pontos Ae e Ba, opostos no lago. Os resultados em t e r foram de 14 minutos, isso mostra que este fenômeno é bem representado pela batimetria t .

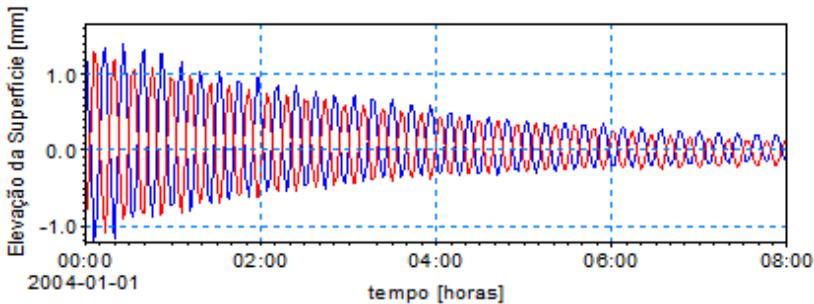


Figura 34 – Elevação do nível da água em milímetros para os pontos de observação Ae (vermelho) e Ba (azul).

4.7 MOVIMENTO DE PARTÍCULAS EM r E FLUXO

O estudo do transporte de partículas teve o intuito de ilustrar como seria, de maneira simplificada, a movimentação das cianobactérias distribuídas em duas camadas distintas (representando as condições de risco alto e risco moderado, item 2.2.2), em condições de equilíbrio dinâmico. Optou-se por utilizar apenas a batimetria real com os resultados das simulações 8 e 12, visto que a função da batimetria simplificada era de compreender os aspectos básicos da circulação. A análise dos resultados restringiu-se à observação da mistura das partículas e ao cálculo da variação da massa na região norte e sul do

lago. Definiu-se como região norte aquela acima da latitude 6130100 metros, e sul, abaixo deste valor. Além disso, sabe-se que a captação de água pela CASAN se dá na saída do Canal Sangradouro da Lagoa do Peri, e, a região de recreação, como área de praia, foi considerada a área acima da captação ao leste do lago. A Figura 35 (A, B e C) apresenta a posição inicial das partículas e as circulações a qual foram submetidas, para vento nordeste e sul, respectivamente. Para analisar a variação da massa no sistema, tomou-se como valor referência a massa total de partículas no lago no início da simulação, M_T ; a massa inicial para o norte do lago, M_N ; e, a massa inicial para o sul do lago, M_S . No início da simulação M_S é 53% M_T e M_N é 47% M_T .

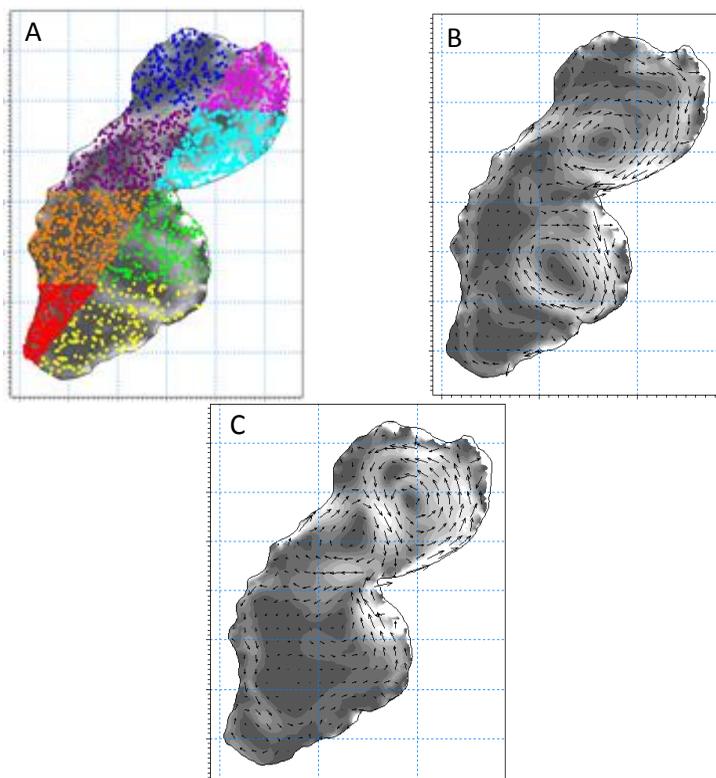


Figura 35 – Localização inicial das partículas (A). Circulação na Lagoa do Peri para forçantes constantes: (B) – Vento Nordeste (C) – Vento Sul.

Ao aplicar o vento nordeste em condição de alto risco, as partículas localizadas a noroeste (cores azul escura e roxa) deslocaram-se para o sul (Figura 36). Em apenas 2 horas M_N decaiu para $34\%M_T$, e, chegou a $20\%M_T$ em 12 horas; enquanto que, M_S chegou a $80\%M_T$. Observa-se ainda, o acúmulo de partículas na região próxima às praias e à captação, provenientes da região nordeste (cores cyan e magenta). O vento sul agiu de forma semelhante, deslocando as partículas em poucas horas para as bordas do lago. No entanto, estas se acumulam na região oeste de encosta do lago e são afastadas da área das praias e captação (Figura 37). Além disso, com vento sul, observaram-se maiores mudanças na variação da massa. Em 12 horas M_N atingiu $90\%M_T$. Houve perda de massa de $1\%M_T$ nesta condição de risco. Acredita-se que esta perda deve-se a partículas que saem da área de cálculo em elementos secos ou sedimentam no fundo do lago.

Para a condição de risco moderado, verificou-se que as partículas permaneceram mais tempo dispersas no lago (Figura 38 e Figura 39). Para o vento nordeste, as partículas localizadas ao sudoeste (vermelhas) são carregadas para norte devido perfil de deriva induzido pelo vento (c_w), após 6 e 12 horas (Figura 38 A e B) e, posteriormente acumulam-se no extremo norte do lago (Figura 38 C e D). Este fluxo é resultado do perfil induzido pelo vento na coluna d'água, adicionado para o cálculo do módulo de transporte de partículas pelo vetor c_w (item 2.5.1.1). Após 12 horas de aplicação de vento nordeste, há um aumento de massa ao sul, passando para $66\%M_T$. Ao final da simulação (após 9 dias) M_S apresenta $62\%M_T$. Ou seja, algumas partículas primeiramente carregadas para o sul, retornam para o norte do lago (perfil induzido pelo vento). Neste momento, observa-se a permanência de algumas partículas no giro ciclone norte (cores cyan e magenta) e no giro sul (cores amarela e verde).

Para a condição de risco moderado e vento sul, M_N aumenta gradativamente até $71\%M_T$ e M_S atinge $28\%M_T$ em 3 dias. As partículas ao norte do lago ficaram retidas nos giros formados, enquanto as de sul permaneceram na região (sul) de baixa velocidade. O fato das partículas permanecerem nos giros também foi descrito por Ji Razmi *et al* (2013) a partir de um estudo da interferência no tempo de residência por diferentes ventos, no Lago Geneva, onde variou-se a intensidade e direção do vento. Este autor mostra que a formação de giros pela atuação de ventos com diferentes direções altera o tempo de residência das partículas em determinadas regiões do lago.

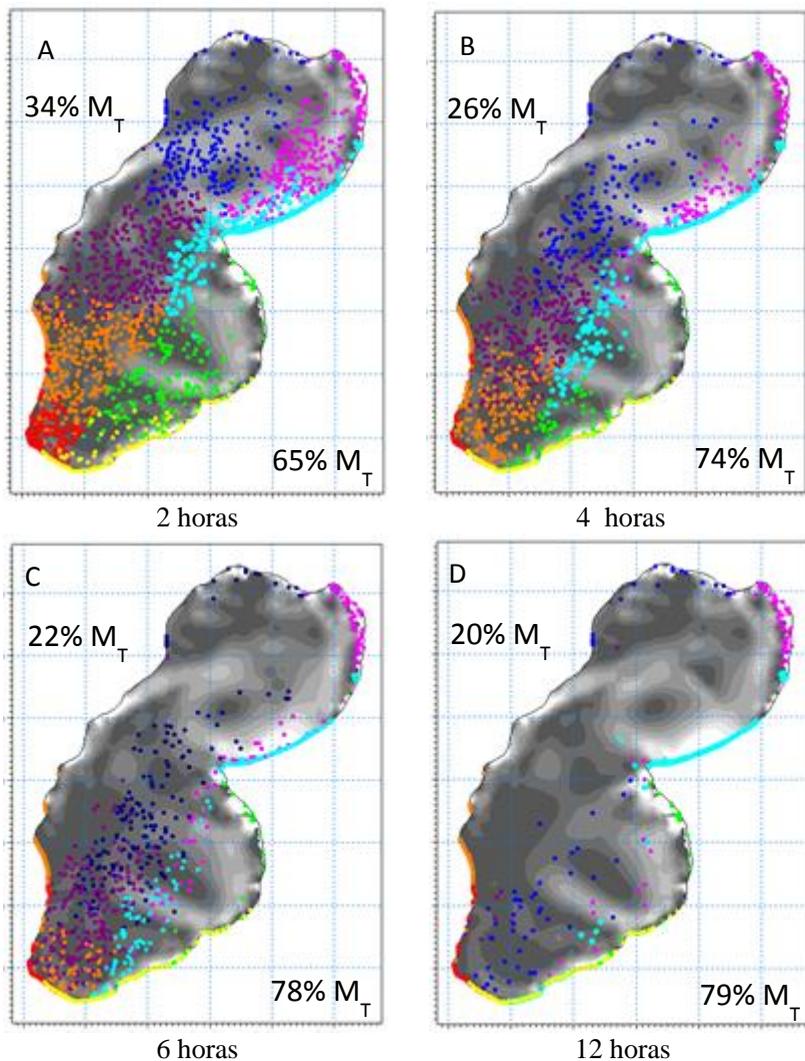


Figura 36 – Transporte de partículas induzido pelo vento nordeste em condição de risco alto, após 2 (A), 4 (B), 6 (C) e 12 horas (D). Os valores de M_S e M_N estão apresentados nos cantos direito inferior e esquerdo superior, respectivamente, para auxiliar a leitura.

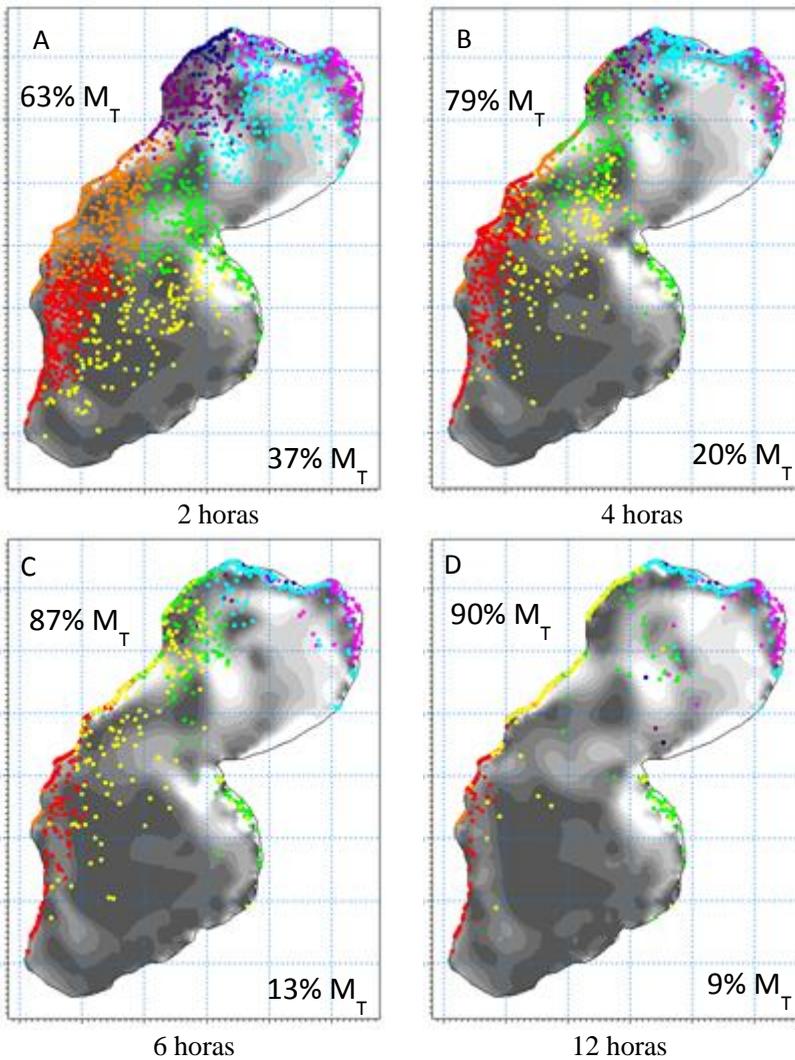


Figura 37 – Transporte de partículas induzido pelo vento sul em condição de risco alto, após 2 (A), 4 (B), 6 (C) e 12 horas (D). Os valores de M_S e M_T estão apresentados nos cantos direito inferior e esquerdo superior, respectivamente, para auxiliar a leitura.

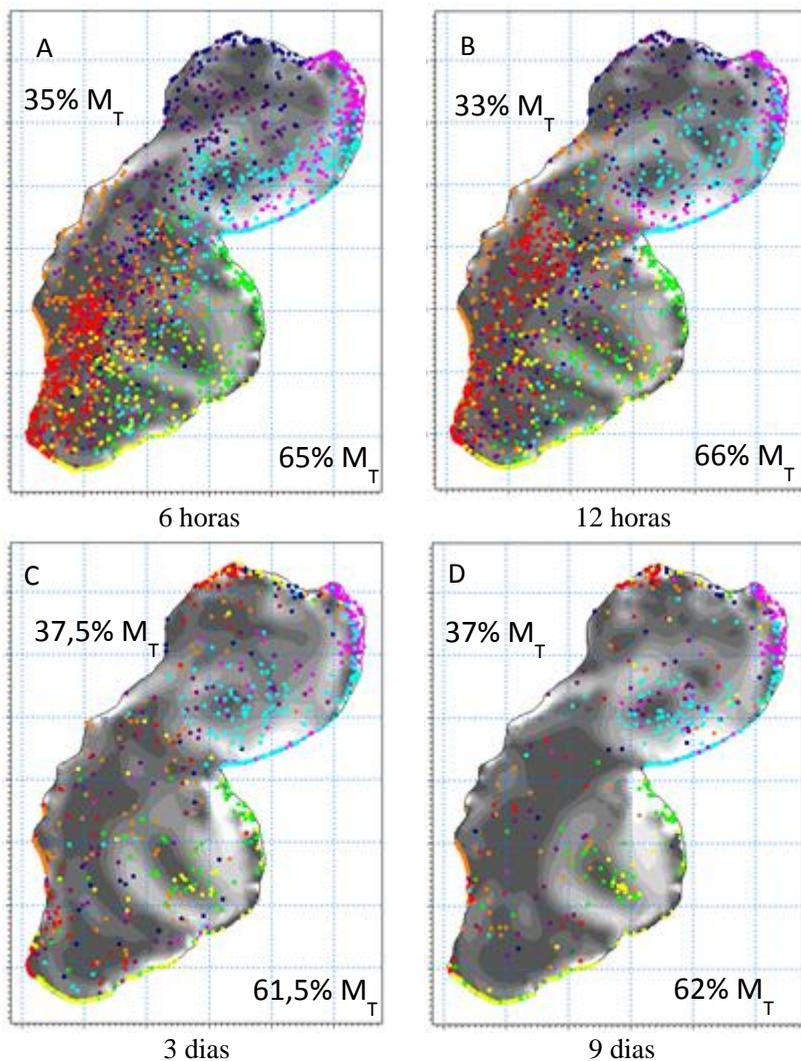


Figura 38 - Transporte de partículas induzido pelo vento nordeste em condição de risco moderado, após 6 horas (A), 12 horas (B), 3 dias (C) e 9 dias (D). Os valores de M_S e M_N estão apresentados nos cantos direito inferior e esquerdo superior, respectivamente, para auxiliar a leitura.

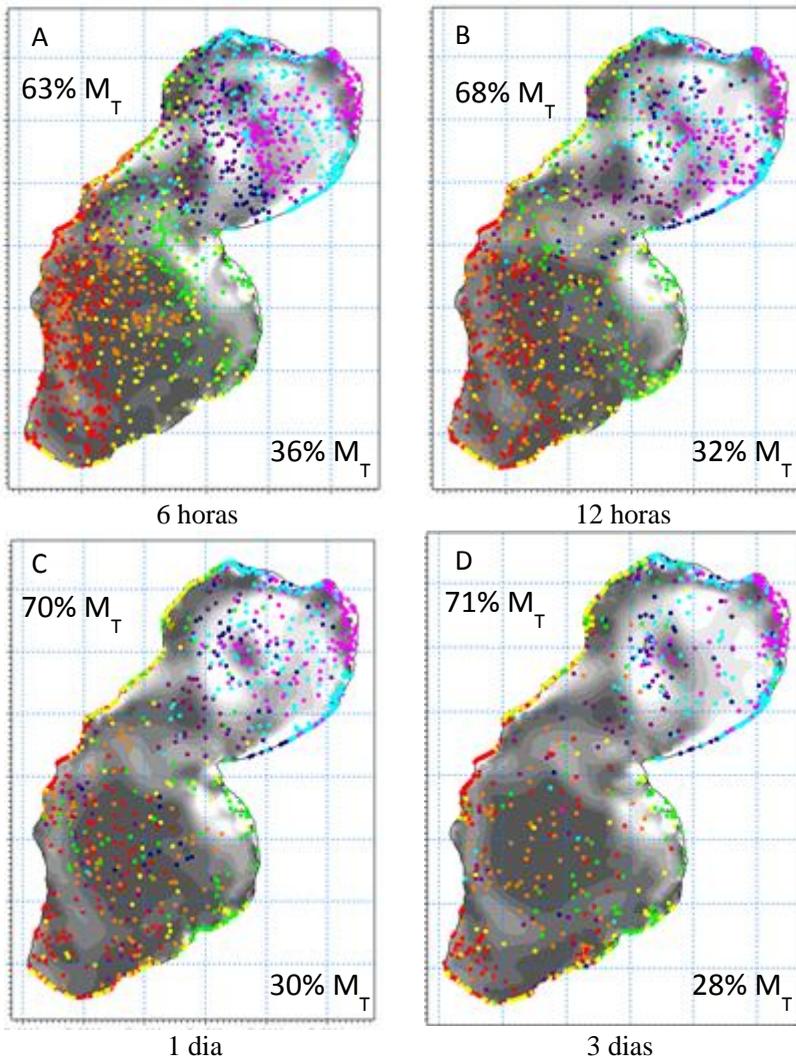


Figura 39 - Transporte de partículas induzido pelo vento sul em condição de risco moderado, após 6 horas (A), 12 horas (B), 1 dia (C) e 3 dias (D). Os valores de M_S e M_N estão apresentados nos cantos direito inferior e esquerdo superior, respectivamente, para auxiliar a leitura.

A partir do módulo de transporte de partículas foi possível observar a mistura das águas superficiais e verificou-se a influência da espessura da camada de distribuição das partículas nos resultados obtidos. Para camadas mais espessas, observou-se maior mistura das partículas de cores diferentes, enquanto que para as menos espessas o perfil do vento aplicado arrastou-as em poucas horas para as bordas do lago. Estes resultados devem-se à aplicação do vetor c_w , que é uma aproximação do perfil do vento para simulação hidrodinâmicas bidimensionais (2DH). Para compreender melhor este processo seria necessário realizar simulações tridimensionais.

Para quantificar a troca de massa d'água por toda a coluna d'água, optou-se por calcular o fluxo em algumas seções (representam o volume de água trocado através de uma seção, por unidade de tempo). A Figura 40 apresenta quatro seções com os vetores da velocidade média na coluna d'água para as simulações 8 e 12.

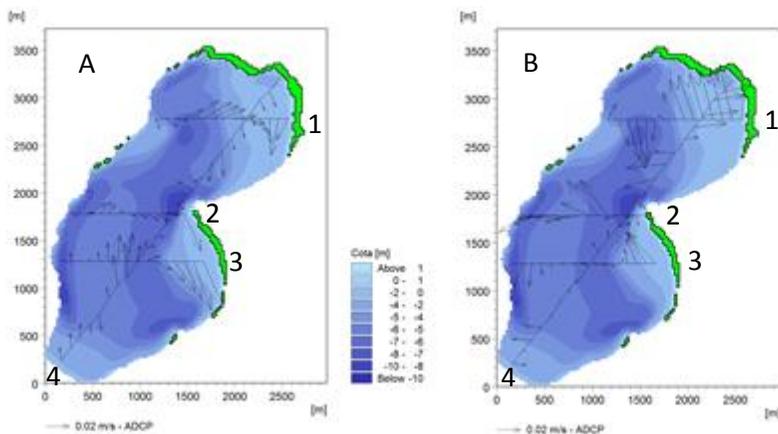


Figura 40 – Velocidade nas Seções 1, 2, 3 e 4. A – Vento Nordeste e B – Vento Sul.

A partir desta figura verificou-se que as regiões mais rasas apresentaram maiores velocidades com mesma direção que a atuação do vento, enquanto nas mais profundas, observa-se o retorno da massa de água, o que está de acordo com a literatura e o que foi observado nas simulações das batimetrias simplificadas. A velocidade da corrente atinge valores maiores ao sul, com aplicação do vento nordeste (B), enquanto que ao norte, há velocidades mais intensas com a atuação do

vento sul (A). Isto é confirmado através do cálculo do fluxo total nas seções a partir dos dados de velocidade, profundidade e distância entre os pontos (Figura 41).

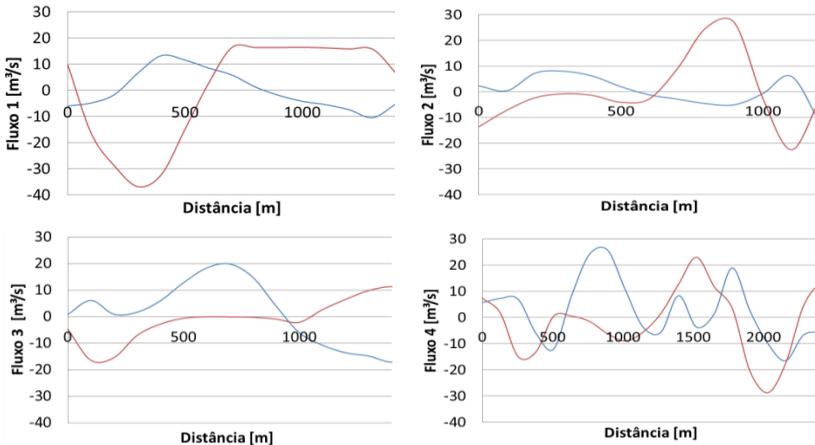


Figura 41 – Fluxo nas Seções 1, 2, 3 e 4. A cor vermelha representa o Vento Sul, e, azul, o Vento Nordeste.

Na Tabela 10, apresenta-se o fluxo residual e total das seções detalhadas nas Figura 40 e Figura 41. O fluxo residual é a soma do fluxo na seção levando-se em consideração o sentido da corrente. Ao contrário, para o fluxo total, somam-se as parcelas em módulo. Toma-se como sentido positivo o norte, para as seções 1, 2 e 3 e ortogonal à seção quatro para oeste. A partir do fluxo residual sabe-se qual o sentido preferencial do fluxo na seção, e quantifica-se a diferença entre os fluxos nos dois sentidos. Com a informação de fluxo total, soma-se a massa de água total que atravessa a seção nos dois sentidos, permitindo quantificar a troca entre determinadas regiões.

Tabela 10 – Fluxo Residual na Seção e Fluxo Total

Seção	Fluxo [m^3/s]			
	Vento Nordeste		Vento Sul	
	Residual	Total	Residual	Total
1	0,56	94,36	2,24	261,22
2	5,64	57,51	0,19	121,29
3	7,41	162,28	-10,63	90,87
4	32,74	209,62	2,98	236,84

Esses resultados indicaram que o vento sul, em comparação ao vento nordeste com mesma intensidade, atuou promovendo maior mistura de água dentro da região norte. Além disso, gerou maior troca de água entre as partes norte e sul do lago, e entre leste e oeste. O vento nordeste, por sua vez, atuou movendo maior quantidade de massa na parte sul do lago.

Para o vento nordeste, o fluxo preferencial mostra-se para norte (seções 1, 2 e 3) e nordeste (seção 4). Para o vento sul, a seção três apresentou fluxo residual negativo, indicando que a maior parte da massa teve direção sul. O vento sul apresentou valores de fluxo total superiores aos do vento nordeste para as seções 1, 2, e 4, sendo inferior apenas em 3.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Desenvolveu-se o presente estudo com a finalidade de contribuir para o desenvolvimento da pesquisa da hidrodinâmica da Lagoa do Peri e sua influência na comunidade fitoplanctônica. Partiu-se da hipótese de que o vento é uma das principais forçantes da circulação deste lago. Neste trabalho, buscou-se compreender aspectos básicos da resposta obtida através do modelo hidrodinâmico MIKE21 para aplicação de ventos constantes em um lago costeiro.

O teste feito com as simulações forçando-se vazão e vento demonstraram que, para os valores aplicados (Tabela 5), o vento domina a formação dos giros e características gerais da circulação. A batimetria simplificada t não representou os giros formados no lago real para simulações aplicando-se apenas a vazão.

A partir da aplicação do vento nas batimetrias simplificadas (e e t) revelou-se a importância do esporão na circulação do lago, que influencia diretamente na formação dos giros, separando-o em parte norte e sul. Com relação à intensidade da corrente formada, em ambas batimetrias e e t , obtiveram-se valores elevados e distantes do obtido em r . Em termos de feições de circulação, giros e seiches, a batimetria t mostrou-se eficiente em representar a batimetria real (r).

Os ventos com diferentes direções (nordeste $\theta=22^\circ$, $\theta=38^\circ$ e sul $\theta=180^\circ$) aplicados na batimetria t , mostraram uma tendência na formação de um giro ciclone na parte norte do lago. O giro alterou seu tamanho e localização de acordo com a direção do vento aplicada. A velocidade média da corrente formada mostrou alterações inferiores a 8% para diferentes direções de vento. Os valores de intensidade da corrente, para as três direções, apresentaram frequência de ocorrência semelhante entre si. A análise da distribuição espacial da intensidade da corrente e energia, feita para as direções 22° e 180° , apresentaram alterações nas regiões onde se formam os giros. A relação entre as energias apresentou grandezas de $0,1\%E_R$ a $100E_R$.

A variação na intensidade do vento, por outro lado, mostrou alterações na velocidade da corrente formada. A velocidade média aumentou em 108% do valor obtido com vento sul de intensidade de 4 m/s para o valor obtido com vento sul de intensidade de 8 m/s. Foi mantida a formação dos giros, tornando-os menos velozes no centro e mais velozes nas extremidades. Verificou-se que a variação espacial da energia atingiu grandezas maiores para a variação da direção ($-3 < \log_{10} \frac{E}{E_R} < 2$) do que para a variação da intensidade do vento ($-1,5 < \log_{10} \frac{E}{E_R} < 1$).

O cálculo da energia contida apresentou resultados em uma faixa próxima da esperada e apresentada por Imbodem e Wüest (1995), exceto para simulação de vento sul 22° com intensidade de 8 m/s, na batimetria t , que superou 10 J/m² (13,63 J/m²). A elevação da superfície causada pela atuação do vento sul a 8 m/s e vento nordeste 4 m/s apresentou valores na ordem de milímetros. O resultado analítico do período de seiches, obtido através da fórmula de Meridian, é próximo ao resultado do modelo hidrodinâmico para as batimetrias t e r .

Através do módulo de transporte de partículas simularam-se os ventos nordeste e sul em condições de risco alto e moderado na batimetria r . Em cenários de alto risco as partículas se acumulam nas bordas do lago em menos de 12 horas. Para vento nordeste, permanecem próximas à região das praias e captação de água, para o vento sul, as partículas são levadas para a encosta à oeste, afastando-as da região de captação. Em risco moderado, permanecem mais tempo dispersas no lago. Nesta condição, para ambas as direções de vento, houve acúmulo de partículas próximo às praias e captação de água. Para o vento nordeste, após nove dias observou-se que as partículas ficaram retidas no centro dos giros ciclone. Observou-se a importância da distribuição das partículas em camadas e da aplicação do perfil de vento induzido no resultado final, o que revelou a necessidade do estudo hidrodinâmico tridimensional. Através do cálculo do fluxo em quatro seções na batimetria r , verificou-se que o vento sul gera maior troca de massa na região norte, entre as regiões norte e sul e de leste para oeste, em comparação ao nordeste. Este último, por sua vez, gera maior troca de massa na região sul do lago.

Os resultados apresentados restringem-se apenas a uma análise das respostas deste modelo para algumas características deste lago. Isso porque que se utiliza de cenários constantes de vento, o que não acontece na realidade. Para que calibrar e validar este modelo, primeiramente, são necessárias campanhas de campo para obtenção de dados de dados de entrada reais de vento e vazão. Necessita-se de dados de vazão afluente para, pelo menos, os rios Ribeirão Grande e Cachoeira Grande. Além disso, sugere-se um estudo da vazão que verte na barragem do Canal Sangradouro. Não obstante, percebe-se a necessidade da integração das diferentes áreas da pesquisa, como a engenharia e a ecologia, e, companhia de saneamento e instituições de proteção ambiental, para que se produzam estudos com resultados úteis à sociedade, garantindo a qualidade da água e preservação deste manancial.

REFERÊNCIAS

ABBOT, M B; BASCO, D R. **Computational Fluid Dynamics: An introduction for Engineers**. Singapore: Longman Group, 1989.

ANYAH, Richard O.; SEMAZZI, Fredrick. **Idealized simulation of hydrodynamic characteristics of Lake Victoria that potentially modulate regional climate**. International Journal Of Climatology, [s.l.], v. 29, n. 7, p.971-981, 15 jun. 2009. Wiley-Blackwell. DOI: 10.1002/joc.1795.

BANCO NACIONAL DE METEOROLOGIA [http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/] 2015.

BAPTISTA, Melissa; NIXDORF, Brigitte. Low disturbances favor steady state: case of cyanobacterial monodominance in a Brazilian coastal lagoon. **Inland Waters**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.243-254, 1 abr. 2014. Freshwater Biological Association (publisher). <http://dx.doi.org/10.5268/iw-4.2.648>.

BELETSKY, Dmitry; SAYLOR, James H.; SCHWAB, David J.. **Mean Circulation in the Great Lakes**. Journal Of Great Lakes Research, Michigan, v. 25, p.78-93, jan. 1999.

BERNARDELLI, Priscilla Veiga. **Característica Morfométrica da Bacia Hidrográfica da Lagoa do Peri**. 2015. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

BENNET, John R. **On the Dynamics of Wind-Driven Lake Currents**. Journal of Physical Oceanography. Rockville, v. 4. P 400-414. Jan 1974.

CASAN. **Mananciais da Ilha**. Disponível em: <<http://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/manancias-da-ilha#0>>. Acesso em: 1 jun. 2016.

CARDOSO, Francielle da Silva et al. **Análise do uso e ocupação da terra na bacia da Lagoa do Peri, Florianópolis (SC)**. Caminhos da Geografia, Uberlândia, v. 9, n. 27, p.201-213, ago. 2008. Disponível em:

<<http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>>. Acesso em: 06 ago. 2015.

CSANADY G. T. **On the cyclonic mean circulation of large lakes.** Preeceedings of the National Academy of Sciences USA, Massachusetts. v. 74. pp 2204-2208. Junho 1977

CONAGE Consultoria Técnica Ltda (Rio de Janeiro). **Levantamento Batimétrico - Lagoa do Peri.** Rio de Janeiro. 1998. 24 p.

DHI. **MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM.** 2014. Disponível em: <http://www.donpedro-relicensing.com/Lists/Announcements/Attachments/59/MIKE_321_FM_Scientific_Doc.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2015

DEAN, Robert G.; DALRYMPLE, Robert A.. **Advanced Series on Ocean Engineering: WATER WAVE MECHANICS FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS.** London: World Scietific Publishing Co. Pte. Ltd, 1984. 371 p.

ESTEVEES, Francisco de Assis. **Fundamentos de Limnologia.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FOX, W. T., 2985. **Modelling coastal environments.** In: R. A. Davis (Editor), Coastal Sedimentary Environments. Springer-Verlag, New York, pp. 665-179.

FRAGOSO JÚNIOR, Carlos Ruberto. **MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA ESTRUTURA TRÓFICA EM ECOSISTEMAS AQUÁTICOS CONINENTAIS RASOS.** 2009. 309 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009 a.

FRAGOSO, Carlos Ruberto; FERREIRA, Tiago Finkler; MARQUES, David da Motta. **Modelagem Ecológica em ecossistemas aquáticos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009 b.

HORN FILHO, Norberto Olmiro; LIVI, Natália Steil **Mapa Geoevolutivo de Florianópolis Santa Catarina.** Disponível em:

<http://noticias.ufsc.br/2013/11/ufsc-divulga-mapa-geoevolutivo-da-planicie-costeira-da-ilha-de-santa-catarina/> Acesso em: 18 set. 2015.

HENNEMANN, Mariana Coutinho; PETRUCIO, Mauricio Mello. **Spatial and temporal dynamic of trophic relevant parameters in a subtropical coastal lagoon in Brazil.** Environmental Monitoring And Assessment, [s.l.], v. 181, n. 1-4, p.347-361, 30 dez. 2010. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-010-1833-5>.

HENNEMANN, Mariana Coutinho; PETRUCIO, Mauricio Mello. **Seasonal phytoplankton response to increased temperature and phosphorus inputs in a freshwater coastal lagoon, Southern Brazil: a microcosm bioassay.** Acta Limnologica Brasiliensia: Biological Limnology, Florianópolis, p.295-305, 2010.

HENNEMANN, Mariana Coutinho. **Dinâmica da Qualidade da Água em uma Lagoa Costeira: o Caso Peculiar da Lagoa do Peri, Ilha de Santa Catarina, Brail.** 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ecologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

IMBODEN, D. M.; WÜEST, A. **Mixing mechanisms in lakes**, in A. Lerman, D. M. Imboden & J. R. Gat, eds, 'Physics and Chemistry of Lakes', Springer Verlag, pp. 83–138. 1995.

JI, Zhen-gang; JIN, Kang-ren. **Gyres and Seiches in a Large and Shallow Lake.** Journal Of Great Lakes Research, Florida, v. 32, p.764-775, jan. 2006. Disponível em: <www.bioone.org>. Acesso em: 10 mar. 2016.

JIA, Peng; LI, Ming. Dynamics of wind-driven circulation in a shallow lagoon with strong horizontal density gradient. **J. Geophys. Res.**, [s.l.], v. 117, n. 5, p.1-14, maio 2012. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1029/2011jc007475>.

JÓZSA, János. **Shallow Lake Hydrodynamics: Theory, measurement and numerical model applications.** Mundus-Euroaque. Budapeste, 2006.

JRNOVO SERVIÇOS TECNICOS LTDA. **RELATÓRIO FINAL: Levantamento topobatimétrico da Lagoa do Peri e Rio Sangradouro.** Florianópolis: N.I., 2014.

KLEIN, Robert. **Hydrodynamic simulation with MIKE21 of Mele Bay and Port Vila,** Vanuatu: NI., 1998.

KJERFVE, Bjorn; MAGILL, K. E.. **Geographic and hydrodynamic characteristic of shallow coastal lagoons.** *Marine Geology*, Columbia, p.187-199, 1989.

KJERFVE, B. **Coastal Lagoons.** In: Kjerfve, B. (ed.), *Costal Lagoon Processes*, p. 1–8. Amsterdam: Elsevier Science, 1994.

KJERFVE, Bjorn et al. **Oceanography of Coastal Lagoons.** *Estuarine Variability ?*

LAIRD, Neil F.; WALSH, John E.; KRISTOVICH, David A. R.. **Model Simulation Examining the Relationship of Lake-Effect Morphology to Lake-Shape, Wind Direction, and Wind Speed.** *American Meteorological Society, Illinois*, v. 131, p.2102-2111, set. 2003.

MARSILI-LIBELLI, S.; PACINI, G; CVELLI, P. **Applicaton of a teo-dimensional hydrodynamic model for shallow waters to the Orbetello Lagoon.** In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROINFORMATICS, 2002, Florence. **Proceedings.** Cardiff: IWA Publishing, 2002. p. 371 - 376.

MCDOWELL, D. M.; O'CONNOR, B. A.. **Hydraulic Behaviour of Estuaries.** Manchester: The Macmillan Press Ltd, 1977.

MIRANDA, Luiz Bruner de; CASTRO, Belmiro Mendes de; KJERFVE, Bjorn. **Princípios de Oceanografia: Física de Estuários.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

OLIVEIRA, João Sérgio de. **Análise Sedimentar em Zonas Costeiras: Subsídio ao Diagnóstico Ambiental da Lagoa do Peri - Ilha de Santa Catarina-SC, Brasil.** 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ORKIC, Mirko; LAZAR, Martin. **Mean Cyclonic versus Anticyclonic Circulation in Lakes and Inland Seas**. Journal Of Physical Oceanography, Zagreb, v. 39, p.78-93, 17 fev. 2009.

PAZ, Adriano Rolim da. **Análise dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do banhado do taim (RS)**. 2003. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Cap. 3.

PENTEADO, Adriana Nunes. **Subsídios para o Plano de Manejo do Parque Municipal da Lagoa do Peri - Ilha de Santa Catarina, Florianópolis - SC**. 2002. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

PEREIRA, Fábio Farias. **Modelo Hidrodinâmico e de Transporte Bidimensional de Grade Não Estruturada para Lagos Rasos**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. São Paulo: EESC-USP, 2006.

RAZMI, A. M. et al. Direct effects of dominant winds on residence and travel times in the wide and open lacustrine embayment: Vidy Bay (Lake Geneva, Switzerland). **Aquatic Sciences**, [s.l.], v. 76, n. 1, p.59-71, 23 out. 2013. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s00027-013-0321-8>.

RODRIGUES, Maria Laura Guimarães; FRANCO, Davide; SUGAHARA, Shigetoshi. **Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina**. Revista Brasileira da Geofísica, Florianópolis, v. 2, n. 22, p.135-151, set. 2004.

ROSMAN, Paulo Cesar Colonna. **Referência Técnica do SisBaHiA**. Rio de Janeiro, 2015.

ROSMAN, Paulo Cesar. **Modelos de Circulação em Corpos de Água Rasos**. In: WROBEL, Luis Carlos. **Métodos numéricos em recursos hídricos**. Rio de Janeiro: ABRH, 1989. p. 156-221.

SOUZA, Marcio Fabiano de; SCHETTINI, Carlos Augusto França. **Assessment of tide and wind effects on the hydrodynamics and interactions between Tijucas Bay and the adjacent continental shelf**, Santa Catarina, Brazil. *Revista Brasileira da Geofísica*, Florianópolis, v. 32, p.515-529, mar. 2014.

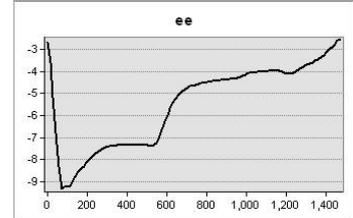
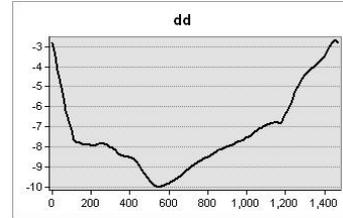
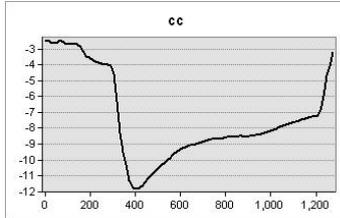
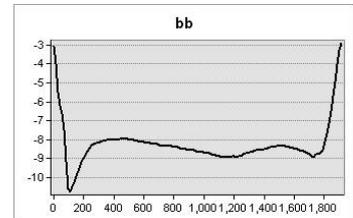
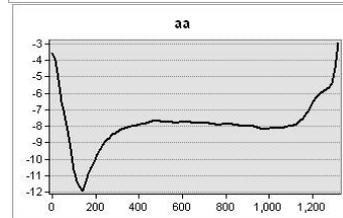
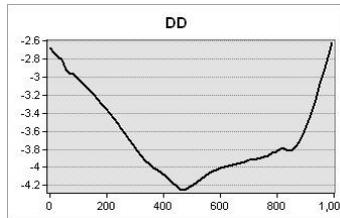
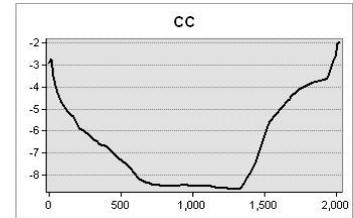
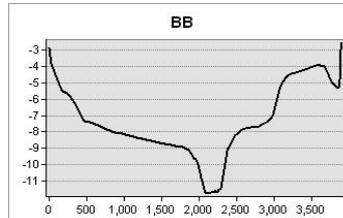
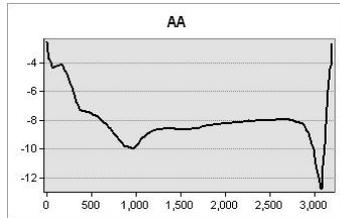
TEIVE, Letícia Frozza; LISBOA, Leonardo Kleba; PETRUCIO, Maurício Mello. **Uma revisão da disponibilidade de dados ecológicos visando o direcionamento de novas pesquisas na Lagoa do Peri**. *Biotemas*, Florianópolis, p.133-143, jun. 2008.

TONETTA, D.; LAUDARES-SILVA, R.; PETRUCIO, Mm.. Planktonic production and respiration in a subtropical lake dominated by Cyanobacteria. **Braz. J. Biol.**, [s.l.], v. 75, n. 2, p.460-470, maio 2015. *FapUNIFESP (SciELO)*. <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.17513>.

WOODROFFE, Colin D. **Coasts**. New York: Cambridge, 2002.

WU, Tingfeng et al. **Dynamics of cyanobacterial bloom formation during short-term hydrodynamic fluctuation in a large shallow, eutrophic, and wind-exposed Lake Taihu, China**. *Environmental Science And Pollution Research*, [s.l.], v. 20, n. 12, p.8546-8556, 16 maio 2013. Springer Science + Business Media. DOI: 10.1007/s11356-013-1812-9.

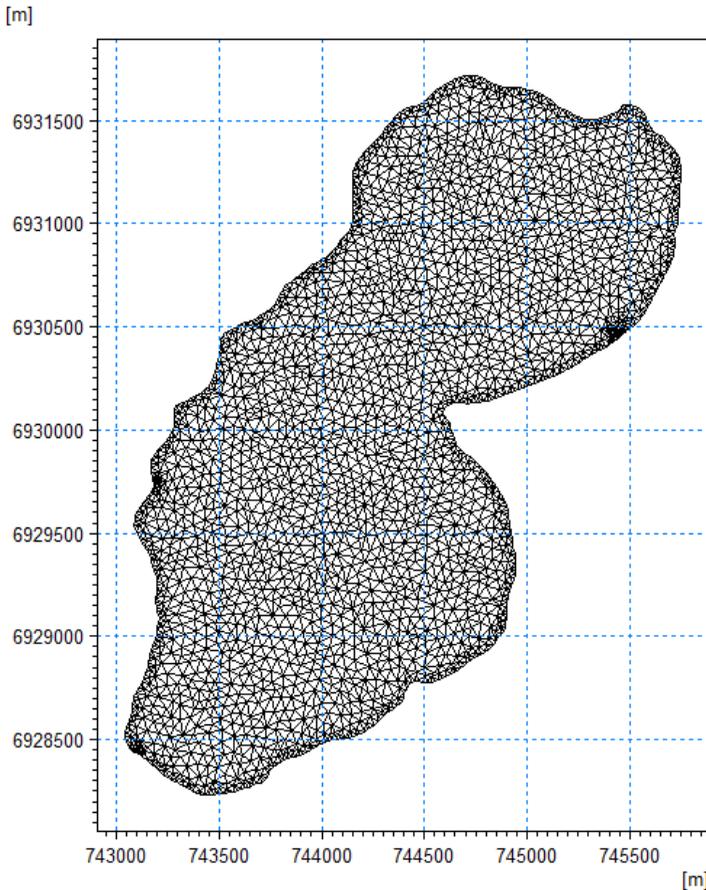
WHO. **Monitoring Bathing Waters** - Practical Guide to the Design and Implementation of Assessments and Monitoring Programmes. London: 2000.

APÊNDICE B – PERFIS LAGOA DO PERI

No eixo y apresenta-se a batimetria (m) e em x a distância longitudinal (m).

APÊNDICE C – MALHA COMPUTACIONAL PARA BATIMETRIA REAL

Na fase de aperfeiçoamento das malhas utilizadas, observou-se que o refinamento da malha diminuíu os erros nos cálculos de conservação da massa quando se utilizou de vazões afluentes e efluentes. As regiões de contorno com a terra apresentam elementos de tamanhos menores aos localizados no centro da malha, com espaçamentos de 20 metros. A região de entrada e saída de vazão apresenta elementos ainda menores que aqueles do contorno com a terra, com espaçamentos em 5 metros.



APÊNDICE D – MALHA COMPUTACIONAL PARA BATIMETRIAS SIMPLES

O detalhe na figura abaixo foi extraído da simulação (1).

