

Prognóstico ambiental da qualidade de água de uma lagoa costeira sufocada e urbana após ligação com o mar via dutos afogados

Environmental envisage of water quality in a shoked urban coastal lagoon after connection with the sea via drowned pipes

Lidiane dos Santos Lima¹, Paulo Cesar Colonna Rosman²

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro - CT - sala C209 COPPE-PEEnO – Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, CEP: 21941-972 - Rio de Janeiro – RJ, Brasil.;
lslima@oceanica.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro - CT - sala C209 COPPE-PEEnO – Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica, CEP: 21941-972 - Rio de Janeiro – RJ, Brasil.;
pccrosman@ufrj.br

RESUMO: As lagoas costeiras nas áreas urbanas podem apresentar desafios na qualidade de suas águas devido a interações antropogênicas e ambientais. O caso da Lagoa Rodrigo de Freitas, LRF, localizada na zona sul da cidade do Rio de Janeiro, enquadra-se nesta categoria. A LRF está conectada ao mar por um canal de 850 metros de comprimento chamado Canal Jardim de Alah, cuja largura varia de 9.5 a 18 m e área hidráulica mínima de 4.5m² em relação ao nível médio do mar (NMM). A boca do canal encontra o mar na zona de surf com arco de praia de 3.8 km: à esquerda a praia do Leblon é de 1.2 km e à direita as praias de Ipanema e Arpoador. Estas são praias populares na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. O canal Jardim de Alah é instável em termos hidro-sedimentológicos e a extensão de sua embocadura muitas vezes é obstruída pela areia, sendo necessárias operações de dragagem frequentes para mantê-la aberta. Devido sua fraca capacidade hidrodinâmica, o canal funciona principalmente como a saída mais importante do sistema de macrodrenagem da bacia LRF. O intercâmbio de água e a renovação entre a LRF e o mar ocorre apenas por algumas horas após uma operação de dragagem. Após a dragagem, na maior parte do tempo, a embocadura do canal é obstruída pela areia no final da primeira maré enchente. Este artigo analisa as melhorias na troca e renovação da água entre a lagoa e o mar, resultantes de um eficiente canal modificado conectado ao mar através de 4 tubos submersos, em arranjo semelhante a um sifão. Nesta conexão aperfeiçoada, a seção hidráulica mínima do canal em relação ao NMM é de 21 m². À medida que as seções de fluxo de entrada de tubos no mar estão a cerca de 200 metros do litoral, em região com profundidade de 10 m, a conexão da LRF com o mar torna-se de 1150 m de comprimento.

A LRF tem uma coluna d'água média em torno de 3 m. Durante décadas, a lagoa permaneceu praticamente estagnada e muitas vezes estratificada com a camada inferior de 1 m apresentando valores de salinidade uniformes superiores a 20 ups e às vezes perto de 30 ups. Já a camada 1 m superior apresenta frequentemente valores de salinidade quase uniformes que são aproximadamente metade da camada inferior. Uma consequência direta desse padrão estratificado estagnado é que a camada inferior é anóxica na maioria das vezes. Com a conexão aprimorada com o mar, a lagoa apresentará um padrão dinâmico de estratificação variando com as marés, aumentando os valores de salinidade em direção ao canal e diminuindo em direção à afluência dos rios Macacos e Cabeças na margem norte da lagoa. Os gradientes de salinidade horizontal e vertical tornaram-se tipicamente estuarinos, o que favorece a diversidade biológica. Com a entrada de água do mar rica em oxigênio duas vezes ao dia, a decomposição atualmente anóxica da biomassa morta no fundo mudará, criando uma demanda bioquímica de oxigênio durante o período inicial da

Este artigo é parte integrante da *Revista Recursos Hídricos*, Vol. 38, Nº 2, 81-98, dezembro de 2017.

© APRH, ISSN 0870-1741 | DOI 10.5894/rh38n2-cti4

mudança dos padrões de circulação. O presente estudo apontou que a proposta de uma conexão permanente entre a Lagoa Rodrigo de Freitas e o mar cumpre o objetivo de mitigar os problemas ambientais relacionados às condições anóxicas na camada inferior da lagoa, sanando definitivamente os seguintes problemas ambientais: má qualidade de água devido ao estoque excessivo de nutrientes na LRF que se acumulam devido ao fato de que o sistema atual não exporta os nutrientes acumulados; o processo de dragagem contínuo do canal Jardim de Alah, que implica em altos custos de manutenção para manter sua capacidade de saída e garantia de macrodrenagem da bacia LRF; a perda de características estuarinas devido à estagnação e uniformidade das águas da lagoa, resultando em redução da biodiversidade e baixa qualidade ambiental. A LRF permanentemente interligada ao mar voltaria a apresentar padrões de gradiente com salinidades típicas dos sistemas estuarinos, o que levaria a um aumento significativo da diversidade biológica. As simulações computacionais da circulação hidrodinâmica e da qualidade da água mostraram resultados efetivos, sugerindo uma solução definitiva para os problemas crônicos e seculares da lagoa.

Palavras-chave: Modelagem computacional, Lagoas costeiras, Lagoa Rodrigo de Freitas, Qualidade das águas, Dutos afogados

ABSTRACT: Coastal lagoons in urban areas may present challenges in the quality of their waters due to anthropogenic and environmental interactions. The case of Rodrigo de Freitas Lagoon, LRF, located in the south zone of the city of Rio de Janeiro, fits in this category. The LRF is connected to the sea by the 850 m long Jardim de Alah canal, whose width varies from 9.5 to 18 m, and minimum hydraulic area of 4. 5m² relative to mean sea level (MSL). The mouth of the canal meets the sea in the surf zone of a 3.8 km beach arch: to the left is Leblon beach with its 1.2 km, and to the right the beaches of Ipanema and Arpoador. These are popular beaches in the city of Rio de Janeiro, Brazil. The Jardim de Alah canal is unstable in hydro-sedimentological terms, its mouth stretch if often clogged by sand, and frequent dredging operations are necessary to keep it open. Due to its poor hydrodynamic capacity, the canal operates mostly as the main outflow of the macro-drainage system of the LRF basin. Water exchange and renewal between the LRF and the sea occurs only for a few hours following a dredging operation. After being dredged, most often the mouth stretch of the canal is shoaled and clogged by sand at the end of the first flood tide. This article analyses the improvements in water exchange and renewal between the lagoon and the sea, resulting from an efficient modified canal connected to the sea via 4 submerged pipes, in a siphon like arrangement. In this improved connection, the minimum hydraulic section of the canal relative to MSL is 21 m². As the pipes inflow-outflow sections at the sea are about 200 m seaward of the coastline, in a region with a depth of 10m, the connection of the LRF to the sea becomes 1150 m long.

The LRF has a mean water column around 3 m. For decades, the lagoon remains quasi stagnant and often stratified with the bottom 1m layer presenting uniform salinity values above 20 ups, and sometimes near 30 ups. The top 1m layer often presents quasi uniform salinity values that are about half of the bottom layer. A direct consequence of this stagnant stratified pattern is that the bottom layer is anoxic most of the time. With the enhanced connection to the sea, the lagoon will present a dynamic stratification pattern varying with tides, with salinity values increasing towards the Jardim de Alah canal and decreasing toward the affluence of the Macacos and Cabeças rivers in the northern shore of the lagoon. The horizontal and vertical salinity gradients became typically estuarine, which favors biological diversity. With the inflow of oxygen rich sea water twice a day, the now anoxic decomposition of the dead biomass in the bottom will change, creating a biochemical oxygen demand during the initial period of change of circulation patterns. The present study pointed out that the proposal of a permanent connection between the Rodrigo de Freitas Lagoon and the sea fulfills the objective of mitigating the environmental problems related to anoxic conditions in the bottom layer of the lagoon, definitively healing the following environmental problems: poor quality of water due to the excessive stock of nutrients in the LRF that accumulate due to the fact that the current system does not export the nutrients it has accumulated; the continuous shoaling process of the Jardim de Alah canal, which entails high maintenance costs to maintain its outflowing capacity and guarantee of the macro drainage of the LRF basin; The loss of estuarine characteristics due to the stagnation and uniformity of the lagoon waters, resulting in reduced biodiversity and poor environmental quality. The LRF permanently interconnected to the sea would return to show patterns of salinity gradient typical of estuarine systems, which would lead to a significant increase in biological diversity. The computational simulations of hydrodynamic circulation and water quality showed effective results, suggesting a definitive solution to the chronic and secular problems of the lagoon

Keywords: Computational modeling, Coastal lagoons, Rodrigo de Freitas Lagoon, Water quality, Drowned pipelines

1. INTRODUÇÃO

A Lagoa Rodrigo de Freitas é uma lagoa costeira, essencialmente urbana, com cerca de 2.2 km² de espelho d'água, profundidade média da ordem dos 3 m e está localizada na cidade do Rio de Janeiro – RJ. A sua bacia hidrográfica tem cerca de 23,5 Km², drena a face sul do Maciço da Tijuca, sendo formada, essencialmente, pelas bacias dos rios Cabeças, Macacos e Rainha (Soares *et al.*, 2012). O corpo hídrico em questão é polo de atração para atividades de lazer ao ar livre e sede prática de desportos aquáticos, em particular o remo. Nas margens da lagoa logram as sedes dos principais clubes, além de suas águas comportarem uma raia de remo de grande importância esportiva. Na lagoa, também há prática da pesca comercial de grande importância económica e social e uma colónia de pescadores.

Conforme relatado por Soares *et al.* (2012), mesmo sendo observado um progresso na área sanitária devido à redução de lançamento de esgoto e reformas nas elevatórias operadas pela CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro), os resultados em seu estudo mostram que a Lagoa Rodrigo de Freitas ainda apresenta um grande desequilíbrio ambiental. Dessa forma, o corpo hídrico em questão ainda pode ser classificado como eutrófico ou hipertrófico, devido ao acúmulo dos nutrientes no decorrer dos anos. Sendo assim, ainda são necessárias medidas que previnam e minimizem os efeitos deletérios na lagoa.

A interrupção do aporte de esgoto na LRF por si só não é suficiente para resolver o problema da qualidade ambiental da região, pois o estoque de nutrientes no sistema lagunar é grande fazendo com que o mesmo permaneça em situação ambiental impactada. Os rios que fazem parte do sistema de drenagem na bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas apresentam baixas vazões e poucas vezes em condições oligotróficas. Sendo assim, a única opção de fonte de águas nessas condições tróficas e em quantidade significativa é o mar (Rosman, 2012).

A ligação com o mar é realizada pelo canal Jardim de Alah, este é um canal artificial construído em 1921. Os dados históricos que o canal Jardim de Alah, em situação natural, apresenta instabilidades geomorfológicas em sua embocadura. Isso ocorre devido a constante obstrução ocasionada pela acumulação de areia das praias adjacentes (Oliveira & Fortunato, 2000). O canal possui uma comporta que é manejada pela subsecretaria de gestão de bacias hidrográficas – RIOÁGUAS. De

acordo com RIOÁGUAS (2010) esse manejo ocorre constantemente, contudo através do Boletim de Operação das Comportas e Ações de Proteção do Sistema Lagunar, é possível verificar que não há um padrão de abertura e fechamento das comportas. Em grande parte do tempo, as comportas encontraram-se fechadas o que inviabiliza uma troca permanente da água da lagoa com o mar.

Devido à obstrução constante do Canal Jardim de Alah, as renovações das águas ficam comprometidas, por isso, o presente estudo tem como objetivo desenvolver prognósticos de hidrodinâmica ambiental assim como de qualidade de água para suporte e planejamento de ligação da Lagoa Rodrigo de Freitas ao mar via dutos afogados. As análises ambientais foram embasadas em resultados de simulações de modelos computacionais aferidos e validados que deram suporte para prognosticar as situações projetadas.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

Situada na zona sul da cidade do Rio de Janeiro (Figura 1), a Lagoa Rodrigo de Freitas é regulamentada como uma Área de Proteção Permanente pela Lei Orgânica do Município do Rio de Janeiro conforme artigo 463. O seu balanço hídrico com o ambiente marinho é realizado através do Canal do Jardim de Alah, com 835 m de extensão. A foz do Canal do Jardim de Alah é sistematicamente obstruída por areias transportadas pelas ações das ondas e correntes a elas associadas, como também pela ação dos ventos, razão pela qual necessita ser permanentemente dragada (Alves *et al.*, 1998). O fluxo do Canal Jardim de Alah é determinado em função da maré, com o controle por comporta. Atualmente, essa comporta é aberta somente em períodos de chuvas fortes a fim de extravasar as águas de dentro da lagoa para controlar o seu nível d'água, o que inviabiliza a definição de um padrão para modelagem nessa região. A troca de massas de água entre a lagoa e o mar é restrita, assim como o escoamento de maré dentro da lagoa (Maciel, 2007). Os rios que desaguam na Lagoa Rodrigo de Freitas são: o Rio dos Macacos, com área de drenagem de 7.2 km², o Rio Rainha, com 4.3 km² e o Rio Cabeças, que tem a menor área de drenagem, com 1.9 km² (FEEMA, 2002).

A Lagoa Rodrigo de Freitas caracteriza-se por apresentar velocidades muito reduzidas em quase todo o seu domínio, exceto na área vizinha da sua ligação ao Canal Jardim de Alah. As áreas norte e leste apresentam-se isoladas do resto do corpo

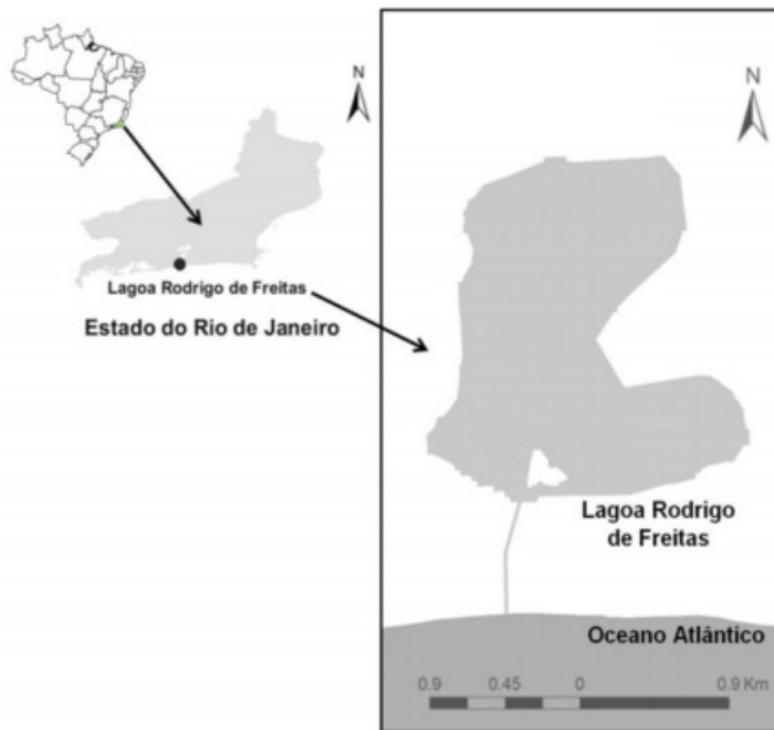


Figura 1. Ilustração da localização da área de estudo, adaptado de Marotta *et al.* (2012).

lagunar, não conseguindo o escoamento induzido pelos fluxos afluentes do Piraquê e pelas marés, promovendo a mistura destas águas com o resto da lagoa. Este cenário justifica os tempos de residência muito elevados que, como consequência, provocam a degradação da qualidade da água. A intensa ocupação urbana de sua bacia hidrográfica, associada à evolução das ações antrópicas com total inobservância de normas elementares de urbanismo, explica o quadro problemático da qualidade de suas águas, que apresentam contínuos problemas das mortandades de peixes e as frequentes inundações na região (LNEC, 2003). A hidrodinâmica da Lagoa Rodrigo de Freitas e do Canal do Jardim de Alah é forçada principalmente por: descargas fluviais, ação direta do vento e maré meteorológica. Atualmente, a maré astronômica tem sua influência restrita ao Canal do Jardim de Alah, não afetando o padrão de circulação no interior da lagoa (AMBIENTAL, 2002). As marés astronômicas na zona costeira são do tipo semi-diurnas com desigualdades diurnas. Têm uma propagação típica de onda de Kelvin no hemisfério Sul, de Oeste para Leste. As amplitudes máximas de marés de sizígia são da ordem de 1.20 m e as mínimas de maré de quadratura de 0.40 m. Os níveis do mar são influenciados por fatores meteorológicos, com períodos característicos de cinco a sete dias.

As amplitudes das marés meteorológicas são da mesma ordem de grandeza das marés astronômicas (Rosman, 1992).

As velocidades residuais em frente às praias de Ipanema e Leblon são dirigidas para Leste. As águas provenientes da Lagoa tendem em direção à Baía de Guanabara, sendo assim, não se espera que detritos derivados desta baía entrem regularmente na Lagoa. A Lagoa Rodrigo de Freitas é atualmente um sistema de águas quase paradas, com velocidades da ordem de 0.01 m/s. Análise harmônica da série temporal de nível medida no centro da LRF identificou uma única componente de maré com amplitude inferior à precisão do equipamento utilizado nas medições de nível. Dessa forma, é possível afirmar que não há influência de maré astronômica no interior da LRF e, portanto, as variações de nível associadas aos períodos semi-diurno e diurnos são desprezíveis. Os níveis na Lagoa são fundamentalmente controlados pelas afluências de descargas fluviais, sendo o nível médio cerca de 0.5 m acima do nível médio do mar (AMBIENTAL, 2002).

Em consequência às baixas velocidades, ocorrem duas zonas prioritárias de retenção no interior da lagoa, a Norte e a Leste. Tanto as vazões provenientes dos rios Cabeças e Macacos, quanto as marés astronômicas e meteorológicas apresentam incapacidade de promover a mistura destas águas

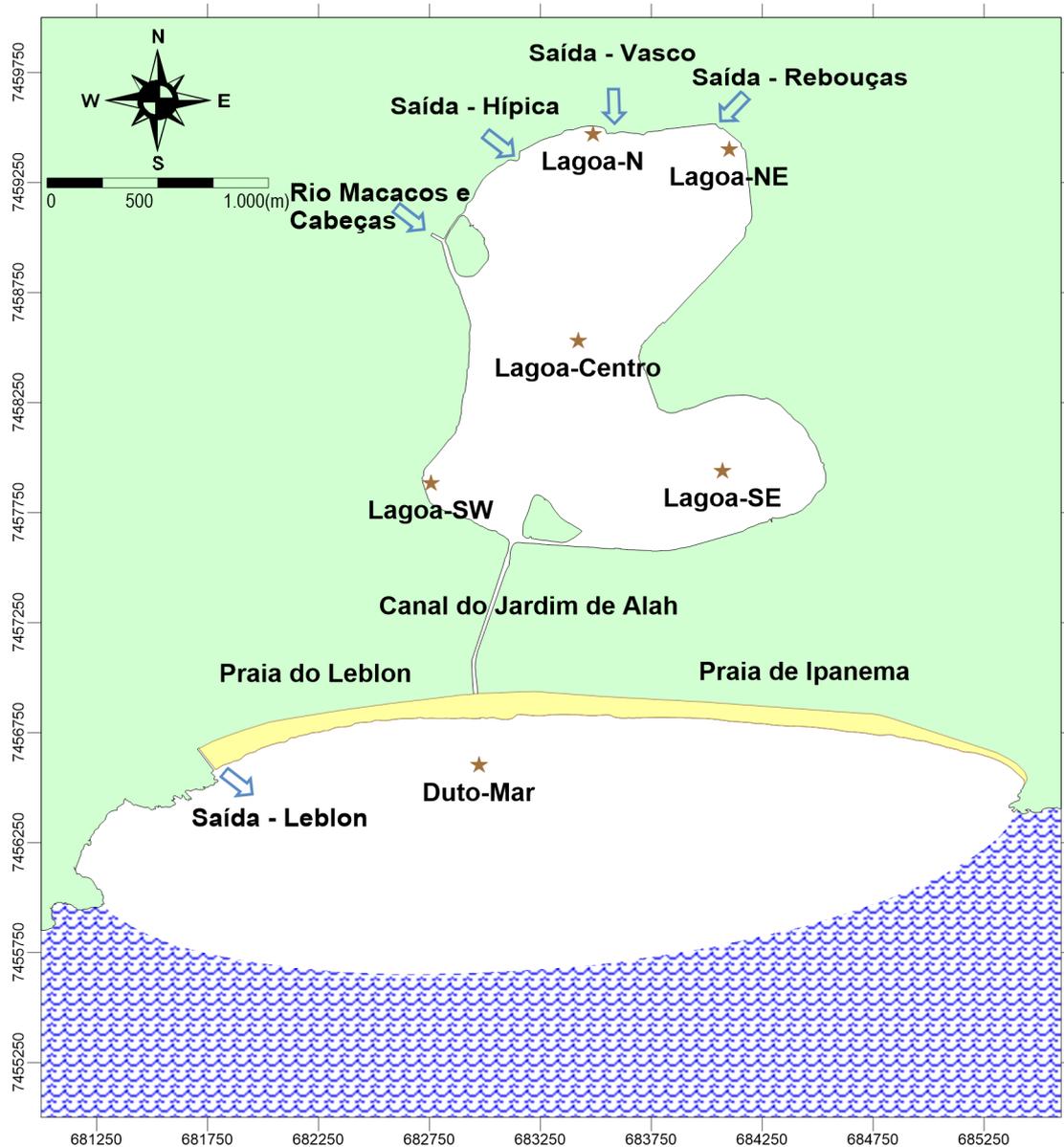


Figura 2. Na ilustração são apresentadas as localizações das estações de controle da modelagem pela simbologia a seguir . Já a simbologia , representa as entradas e saídas de fluxos consideradas no modelo.

com o resto da lagoa. Admite-se que apenas os ventos e pequenas afluições marginais à lagoa consigam misturar a água retida nas duas zonas de retenção.

Os problemas ambientais observados nos grandes centros urbanos muitas vezes não surgem apenas em decorrência das altas densidades populacionais. A ocupação irregular com a construção de grandes prédios, como por exemplo ocorre ao longo do entorno da Lagoa Rodrigo de Freitas, certamente constitui uma forma não recomendável de ocupação (Silva, 2010). O problema apontado como o mais relevante está associado às mortandades de peixes e outras faunas aquáticas que são noticiadas com frequência desde 1930 (Torres, 1990).

2.2. Modelagem Ambiental

A necessidade da aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílio à gestão de recursos hídricos é inquestionável, face à complexidade do ambiente em corpos de água naturais, especialmente em lagos, reservatórios, estuários e zona costeira adjacente das bacias hidrográficas (Rosman, 2010). Os modelos validados são ferramentas que permitem integrar informações espacialmente dispersas, interpolar informações para regiões nas quais não há medições, ajudar na interpretação de medições feitas em estações pontuais, propiciar entendimento da dinâmica de processos, prever situações simulando cenários futuros, dentre outras funcionalidades (Pinto, 2007). Os modelos computacionais utilizados fazem parte

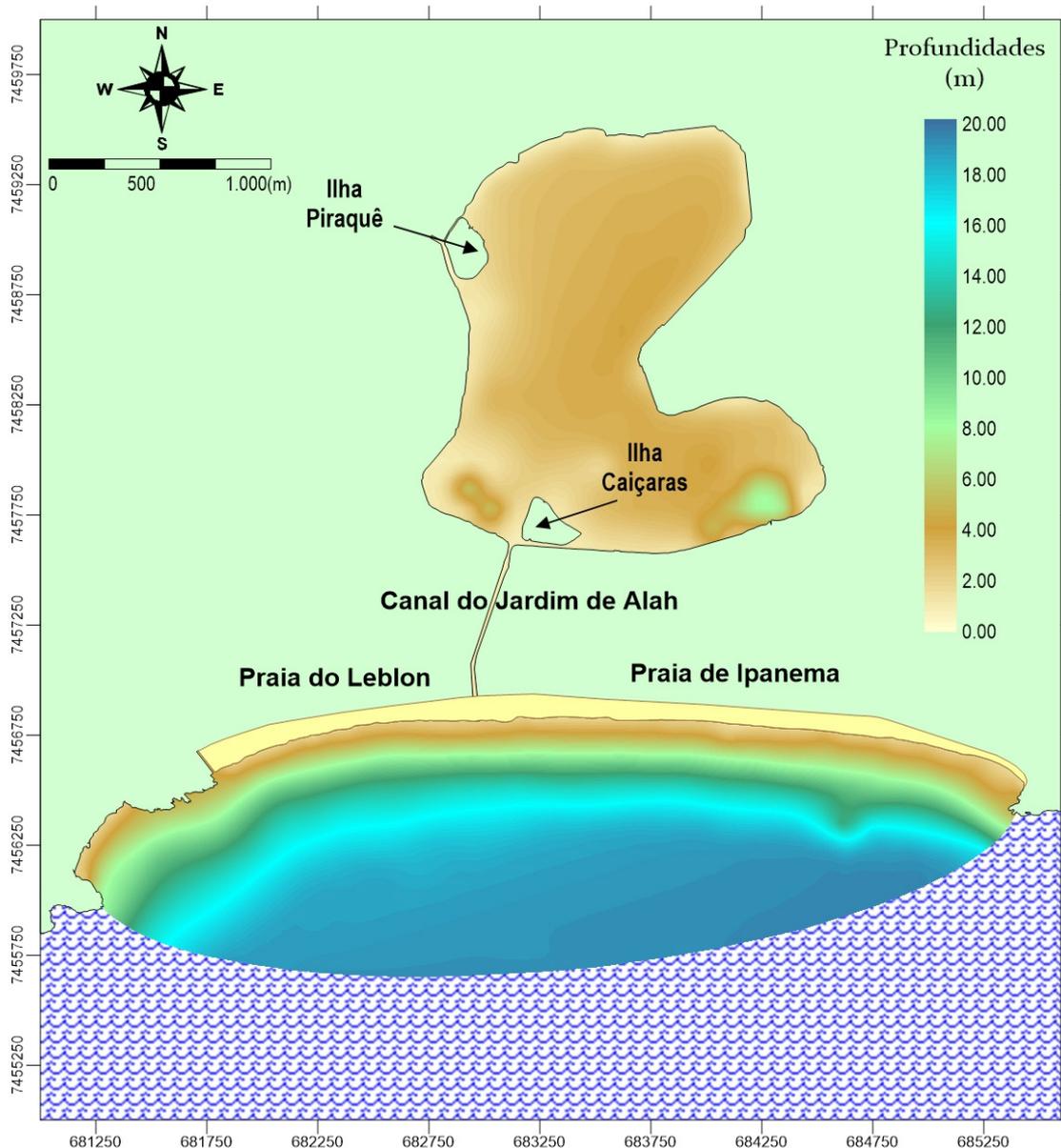


Figura 3. Ilustração da área de abrangência da região de modelagem contemplando as profundidades em metros em relação ao nível médio do mar.

do **Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBaHiA**. O referido sistema profissional de modelos computacionais é registrado pela Fundação Coppetec e pode ser visto em detalhes no *site* <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>. A calibração dos modelos de hidrodinâmica ambiental obedeceu à seguinte ordem: **Nível 1.** Calibração geométrica; **Nível 2.** Calibração hidrodinâmica; e **Nível 3.** Calibração da qualidade de água.

Foram estabelecidas cinco estações de controle na área interna da lagoa, a saber: Lagoa-SW, próximo ao estádio de remo/Shopping Lagoon; Lagoa-SE, nos arredores do Parque do Cantagalo; Lagoa-Centro, próximo à sede náutica do clube de regatas Botafogo; Lagoa-NE, nas mediações do túnel Rebouças; e Lagoa-N, na direção de sede náutica

do clube de Regatas Vasco da Gama. Para os fluxos de entrada e saída tidos na modelagem foram considerados 5 (cinco) fluxos: Saída do Leblon, com descarte na praia adjacente à lagoa no Leblon; Fluxo dos rios Macacos e Cabeças que desaguam na LRF próximo à Ilha Piraquê; e saídas da Hípica, Vasco e Rebouças localizadas nos pontos indicados na sua própria nomenclatura (Figura 2). Uma observação relevante é que a estação Duto-Mar será abordada somente para os parâmetros de qualidade de água. Para o nível médio do mar no período de simulação foi adotada -0.20m. O nível médio diário da lagoa e do mar durante os 31 dias simulados variam na faixa de -0.20 a 0.20 m.

2.2.1 Dados disponíveis

Os dados secundários foram disponibilizados por ocasião dos estudos da Lagoa Rodrigo de Freitas por Rosman em 2009 e pelo LNEC entre 1999 e 2001, além dos dados primários disponibilizados no EIA-RIMA (Estudo e Relatório de Impacto Ambiental) de 2002 (AMBIENTAL, 2002, LNEC, 2000, LNEC, 2003, Rosman, 2009). Entre os dados utilizados, destacam-se os dados de: batimetria, maré, vento, vaza (lodo do fundo), vazões fluviais médias e características dos dutos afogados. Conforme detalhado a seguir:

Batimetria

As informações relativas à batimetria, incluindo os contornos de margens, utilizadas neste estudo foram obtidas através de dados secundários disponíveis por ocasião dos estudos da Lagoa Rodrigo de Freitas pelo LNEC entre 1999 e 2001 (LNEC, 2000, LNEC, 2003), além dos dados disponíveis no EIA-RIMA de

2002 (AMBIENTAL, 2002). A batimetria atual, como vista pelo modelo, está apresentada na Figura 3 que indica a abrangência da região de modelagem a ser considerada.

Dados de maré

As curvas de maré geradas a partir de constantes harmônicas da maré sintética da região estudada estão apresentadas na Tabela 1 e ilustradas na Figura 4, conforme informações da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil. As principais constituintes astronômicas são a M2, S2, O1 e K1, tendo todas elas amplitudes superiores a 5 cm. O quociente entre as amplitudes das principais constituintes diurnas e semi-diurnas é de 0,36, o que indica uma maré semi-diurna com desigualdades diurnas. Para as simulações do modelo da Lagoa Rodrigo de Freitas e regiões adjacentes são considerados o registro de maré da Figura 5.

Tabela 1. Principais constantes harmônicas referentes à região estudada, listadas pela significância da amplitude.

CONSTANTE	AMPLITUDE (M)	FASE (GRAU)
M2	0.288	99.672
S2	0.160	105.671
O1	0.105	89.496
K1	0.058	146.500
K2	0.049	98.675
M4	0.045	149.502
N2	0.035	141.675
Q1	0.028	59.496
P1	0.022	132.497
MS4	0.022	249.500
MN4	0.020	100.503
mu2	0.015	125.673
2N2	0.012	146.672
M1	0.009	129.500
nu2	0.005	127.672
T2	0.005	140.673
MNS2	0.004	98.675
L2	0.004	181.674
SN4	0.004	218.503
M3	0.004	225.625
MO3	0.003	74.628
OO1	0.003	323.498
MK3	0.002	142.626

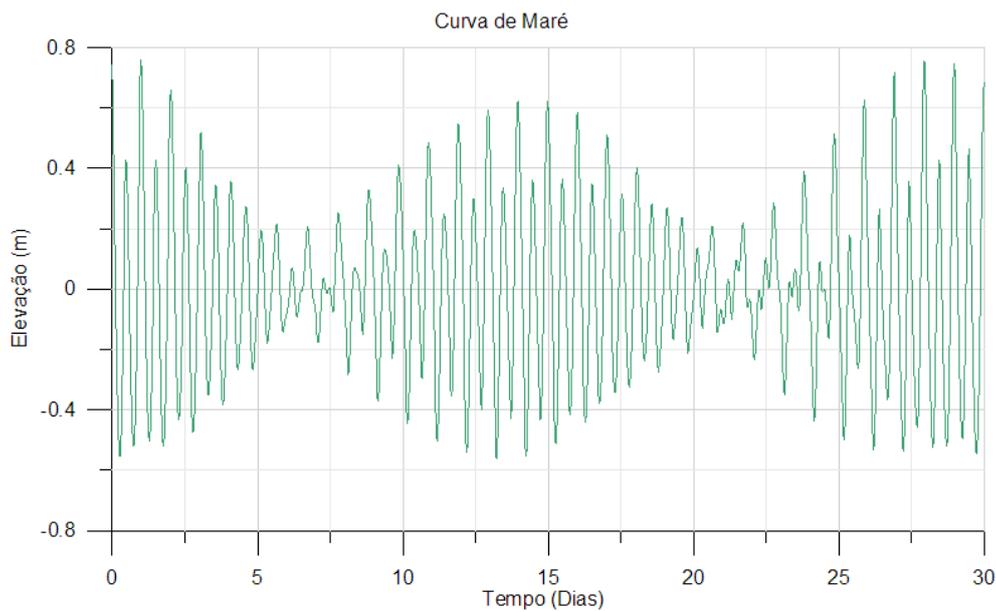


Figura 4. Curva de maré típica da região estudada, ao longo de 30 dias, considerando apenas as principais constantes harmônicas.

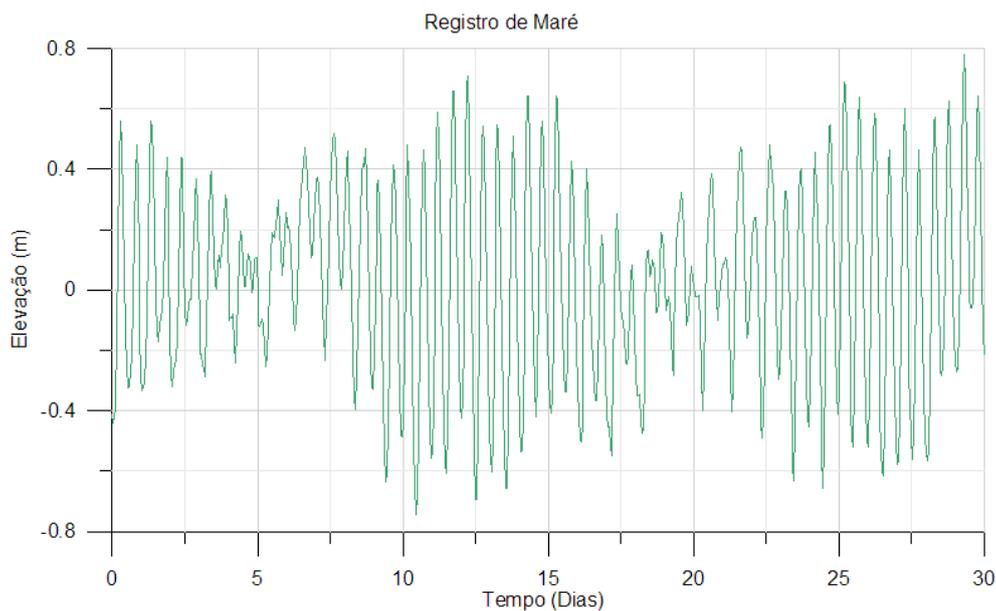


Figura 5. Registro de maré da região estudada, ao longo de 30 dias, ilustrando as condições usadas na modelagem da Lagoa Rodrigo de Freitas e regiões adjacentes.

Dados de vento

Para a modelagem da circulação hidrodinâmica a entrada dos dados de vento pode ter diversos formatos, indo desde constantes no tempo e uniformes no espaço, até totalmente variáveis no tempo e variados no espaço. Para o modelo em questão os dados de vento para modelagem da circulação hidrodinâmica foram variáveis no tempo, mas uniformes no espaço, seguindo os padrões de frente fria com intensidades variáveis de 60 em 60 minutos que estão apresentados na Figura 6.

Vaza (lodo)

O fundo da LRF é recoberto por uma camada espessa e irregular de sedimento, principalmente, de granulometria de areia média, de 30% a 80% e areia fina com 7% a 30% (Brito & Lemos, 1982). A Figura 7 ilustra a estimativa da espessura do lodo não consolidado que foi considerado nas simulações de DBO como fonte sem vazão líquida. Naquela ocasião, o volume total calculado de lodo não consolidado era de $\approx 660.000 \text{ m}^3$ (Rosman, 2010).

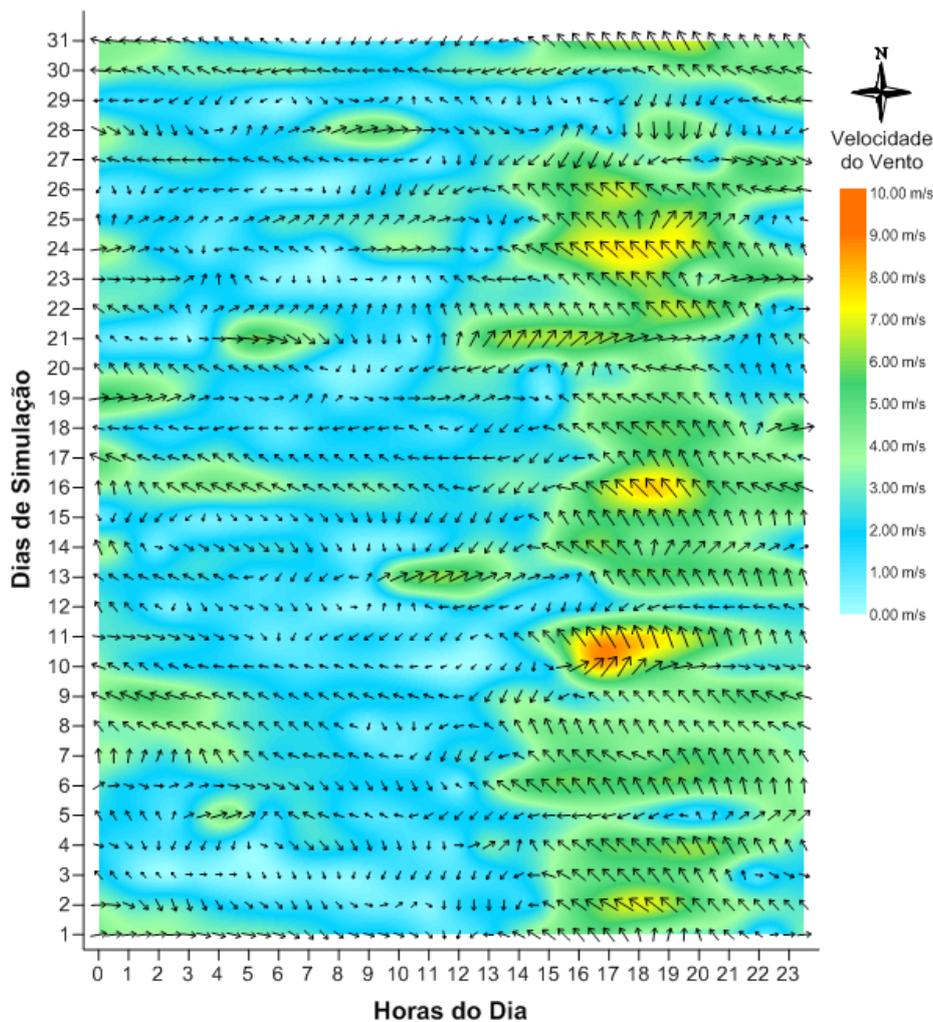


Figura 6. Gráfico da série temporal de ventos de frente fria em metros por segundo (m/s) fornecida ao modelo como dados de entrada. As setas têm módulo proporcional à velocidade do vento, que é indicada pelo padrão de cores. A direção e sentido do vento são indicados pelas setas, em relação à rosa de pontos cardeais (Rosman, 2012).

Vazão dos rios e saídas

Os dados referentes às vazões dos rios considerados na modelagem foram dados secundários disponíveis nos estudos de hidrodinâmica ambiental da LRF por Rosman (2012). Foram considerados dois rios na região modelada além de quatro saídas. As vazões médias adotadas estão apresentadas na Tabela 2:

Características dos dutos afogados

Em linhas gerais, na direção da lagoa para o mar, o Canal do Jardim de Alah seguiria no alinhamento atual aproximadamente até ao local onde se encontra a atual comporta. Daquele ponto em diante, ao invés de seguir via canal dividindo as praias de Ipanema e Leblon, o fluxo seria captado por dutos afogados. Tais dutos seriam enterrados sob a areia e aflorariam em desemboque submerso para além da linha batimétrica de 10 m. A praia de

Ipanema-Leblon deixaria ser dividida e passaria a ser uma faixa contínua de areia. A Figura 8 mostra a concepção proposta. As características dos referidos dutos estão expostas na Tabela 3:

3. RESULTADOS

Foram realizadas simulações para ventos típicos de frente fria e usuais, contudo as variações dos resultados entre essas simulações foram ínfimas. Dessa forma, os gráficos aqui apresentados consideram os ventos de frente fria. Com a finalidade de detectar as variações mais significativas dos parâmetros analisados (circulação hidrodinâmica, taxa de renovação, salinidade, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio), os resultados expostos estão relacionados a uma maré de sizígia.

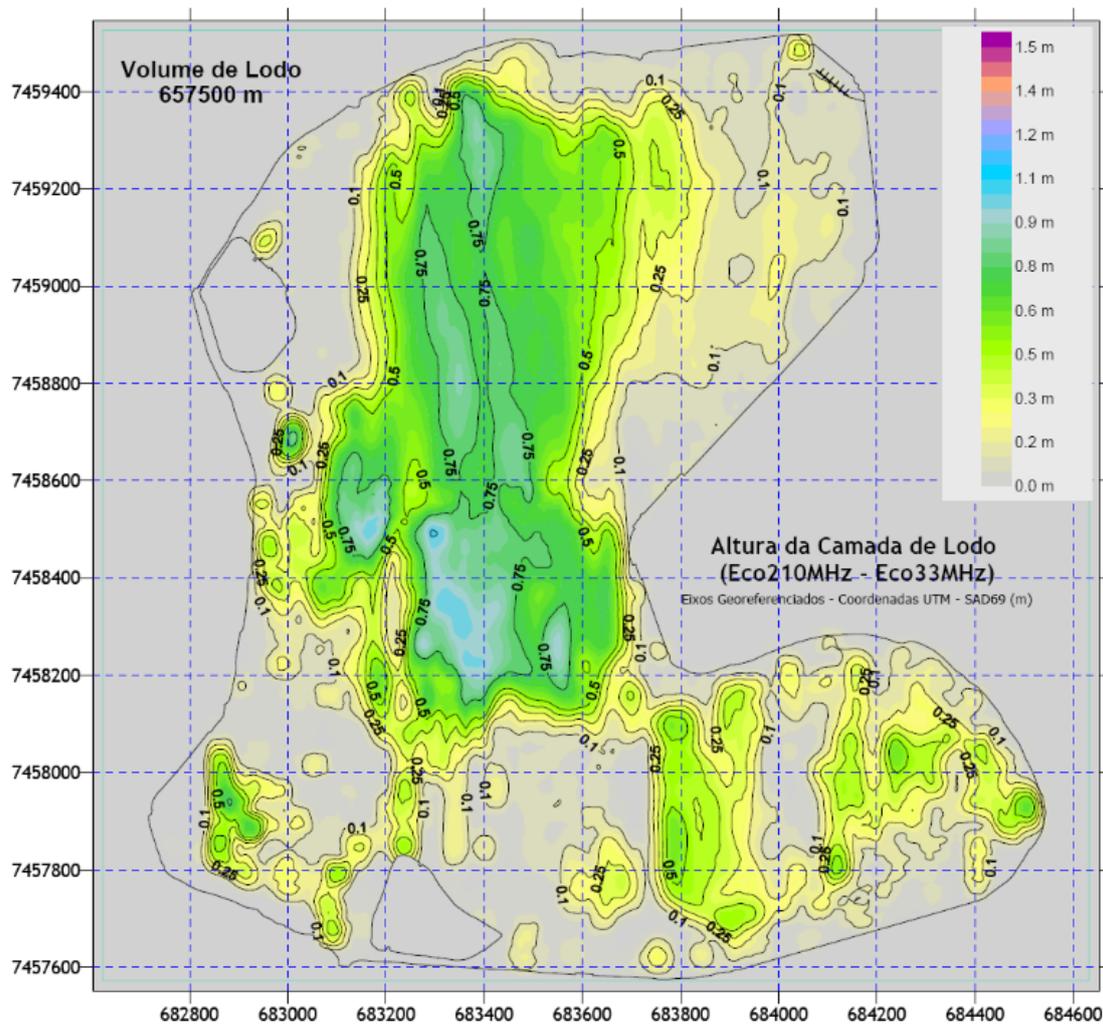


Figura 7. Estimativa da espessura da vaza (lodo não consolidado) existente em 2000, resultando da diferença entre os ecos de baixa e alta frequência (Rosman, 2009).

Tabela 2. Vazões médias dos rios e saídas adotadas para a modelagem (Rosman, 2012).

RIOS E SAÍDAS	Q_M (L/s)
Rios Macacos e Cabeças	300.0
Saída – Vasco	1.0
Saída – Hípica	1.0
Saída – Rebouças	20.0
Saída – Leblon	45.0

Tabela 3. Características adotadas para a modelagem com dutos afogados.

NOME	DUTOS AFOGADOS LRF-MAR
Comprimento (m)	360.00
Área Hidráulica (m ²) – 4 dutos	21.24
Raio Hidráulico (m)	0.65
Amplitude da Rugosidade. Equivalente (m)	0.01
Perda Carga A	0.10
Perda Carga B	0.80
Outras Perdas	1.04
Comporta Basculante	Ausente

3.1. Calibração e validação

A calibração e validação do sistema foram realizadas através da calibração do modelo hidrodinâmico sendo baseada nos dados de maré e calibração de níveis da água. Os dados utilizados foram registrados por um marégrafo localizado na Ilha Fiscal, Rio de Janeiro, RJ com latitude 22 53.8S e longitude 043 09.9W. Os dados foram utilizados ao longo da fronteira aberta incluindo os efeitos

meteorológicos, sendo o nível médio corrigido para o Datum de Imbituba do IBGE, com cota -0.19 m, o qual foi tomado como base no presente estudo. A Figura 9 ilustra a elevação da maré modelada adicionada da meteorológica, assim como, a elevação registrada pelo marégrafo. De acordo com a figura é possível observar que a maré simulada

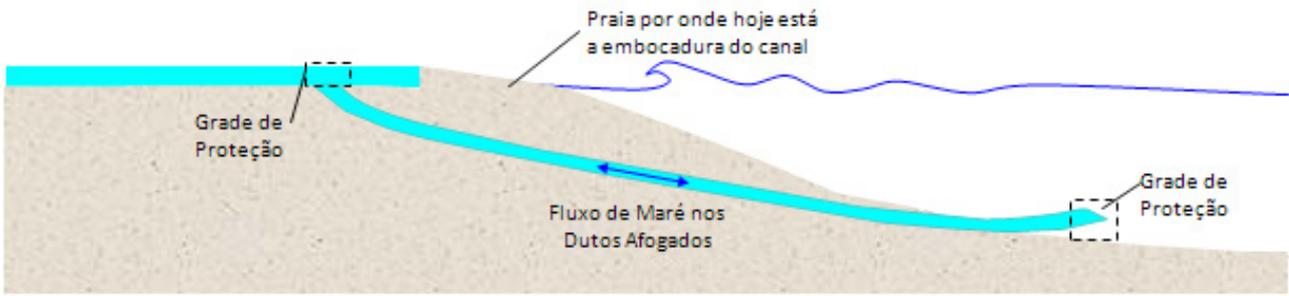


Figura 8. Esquema da ligação da lagoa ao mar via dutos afogados (Rosman, 2009).

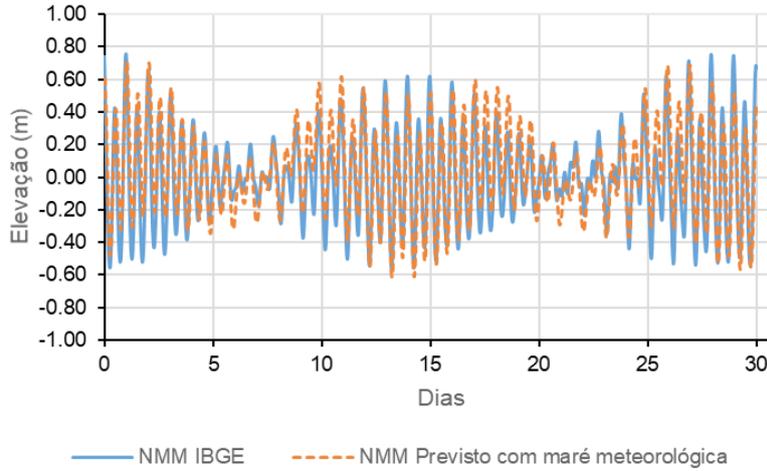


Figura 9. Elevação simulada e registrada referenciada no Datum de Imbituba do IBGE pelo marégrafo localizado na Ilha Fiscal no Rio de Janeiro, RJ.

adicionada da maré meteorológica está muito semelhante tanto em fase, quanto em amplitude da maré registrada. Dessa forma, o modelo mostrou que é capaz de realizar prognósticos satisfatórios da maré na região de estudo.

3.2. Hidrodinâmica ambiental e renovação das águas

Os níveis médios diários do mar apresentam uma variação ligeiramente maior em relação à estação localizada na lagoa. Outra variação percebida é uma pequena defasagem temporal entre as estações na lagoa e no mar. Essa última é mais sensível às oscilações da maré tanto temporal quanto espacialmente. O nível da água no mar apresenta sua oscilação entre -0.75 e 0.75 m. Já na estação localizada na lagoa, o nível da água é amortecido em aproximadamente 66%, apresentando uma variação na faixa de -0.25 a 0.25 m (Figura 10).

As vazões médias calculadas no período de um mês seriam da ordem de 10 m³/s em marés de sizígia e em marés de quadratura da ordem de 8 m³/s. As variações no Canal Jardim de Alah oscilam entre -17.25 a 17.25 m³/s. As variações de vazão

acompanham as variações dos ciclos das marés (sizígia e quadratura) (Figura 11).

De modo geral, a lagoa continuará a apresentar valores de velocidade baixos da ordem de 0.1 m/s em condições de maré de sizígia tanto no período de enchente quanto no de vazante. Ressalta-se que próximo ao Canal Jardim de Alah (desembocadura do duto) é o local que apresenta as maiores velocidades na ordem de 0.4 m/s. Na maré de enchente, é percebido a formação de um vórtice de baixa intensidade à esquerda do canal, já na vazante essa feição se dissipa (Figura 12).

A estação que apresenta a maior taxa de renovação é a Lagoa-SW, seguida pela Lagoa-Centro; a Lagoa N e NE mostram taxas de renovação similares e intermediárias, e a renovação mais lenta é dada na estação Lagoa-SE, onde também se encontra a menor circulação hidrodinâmica do corpo hídrico. Tomando como base a estação de renovação mais lenta (Lagoa-SE), o T_{20} , ou seja, o tempo que a lagoa levará para renovar 20% das suas águas será no 5º dia de simulação, o T_{50} ocorrerá aproximadamente no 11º dia e o seu T_{90} um pouco antes do 30º dia (Figura 13).

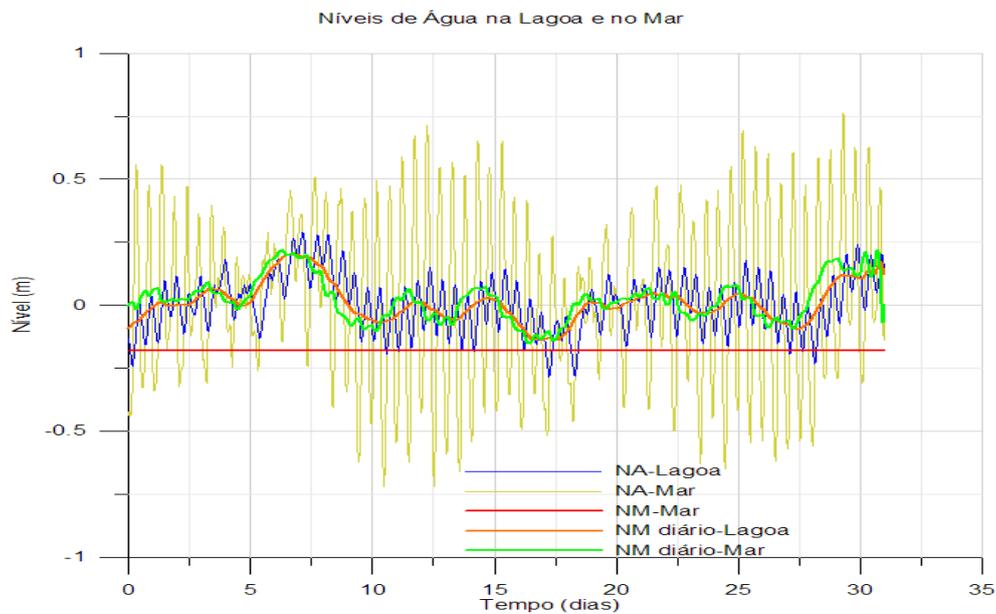


Figura 10. Prognóstico da variação dos níveis de água e dos níveis médios em metros nas estações localizadas na Lagoa Rodrigo de Freitas e no mar adjacente no decorrer de um mês de simulação.

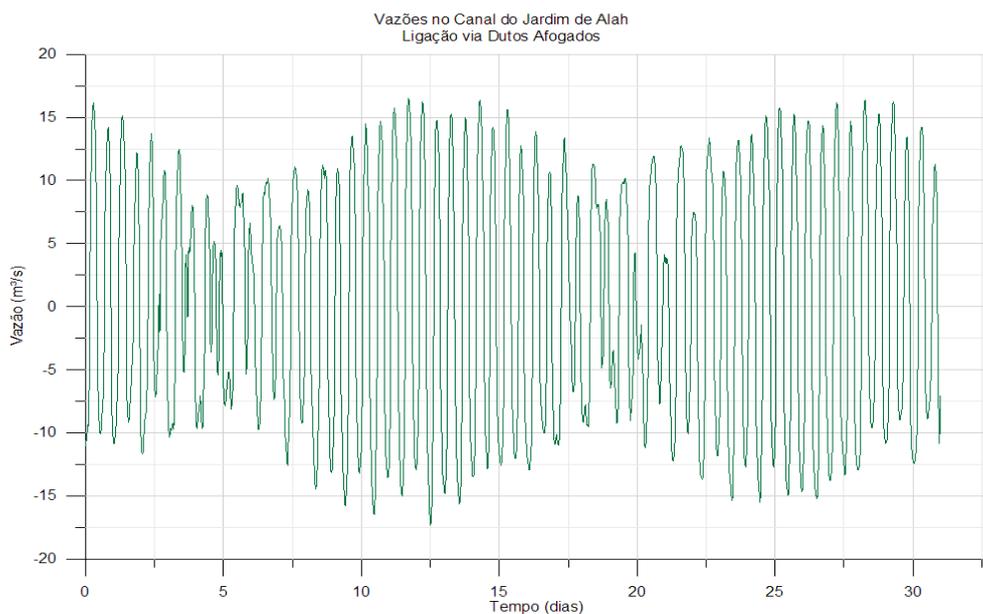


Figura 11. Prognóstico da variação das vazões em metros cúbicos por segundo no decorrer de 31 dias no Canal Jardim de Alah onde ocorre a ligação Lagoa-Mar via dutos afogados.

3.3. Qualidade de água

No momento inicial da simulação, a condição inicial de salinidade no interior da lagoa era de 14 e no lado externo em torno de 34. Na estação localizada no mar (Duto-Mar), é observada a maior variação de amplitude na salinidade, os valores estão dispostos na faixa de 20 a 35. A estação Lagoa-SW apresenta valores entre 17 e 27 com oscilações frequentes no decorrer da simulação. Já a estação Lagoa-SE apresenta uma pequena oscilação em seus valores

com sua média entorno de 24. A estação Lagoa-Centro apresenta valores entre 12 e 17, contudo, mesmo apresentando uma amplitude menor do que as estações Duto-Mar e Lagoa-SW, as oscilações também foram observadas. Já as estações Lagoa-N e NE apresentam os valores mais baixos de salinidade aproximadamente de 3 e sem oscilações significativas (Figura 14).

Na estação Duto-Mar estão presentes os valores mais altos de Oxigênio Dissolvido (OD). As estações

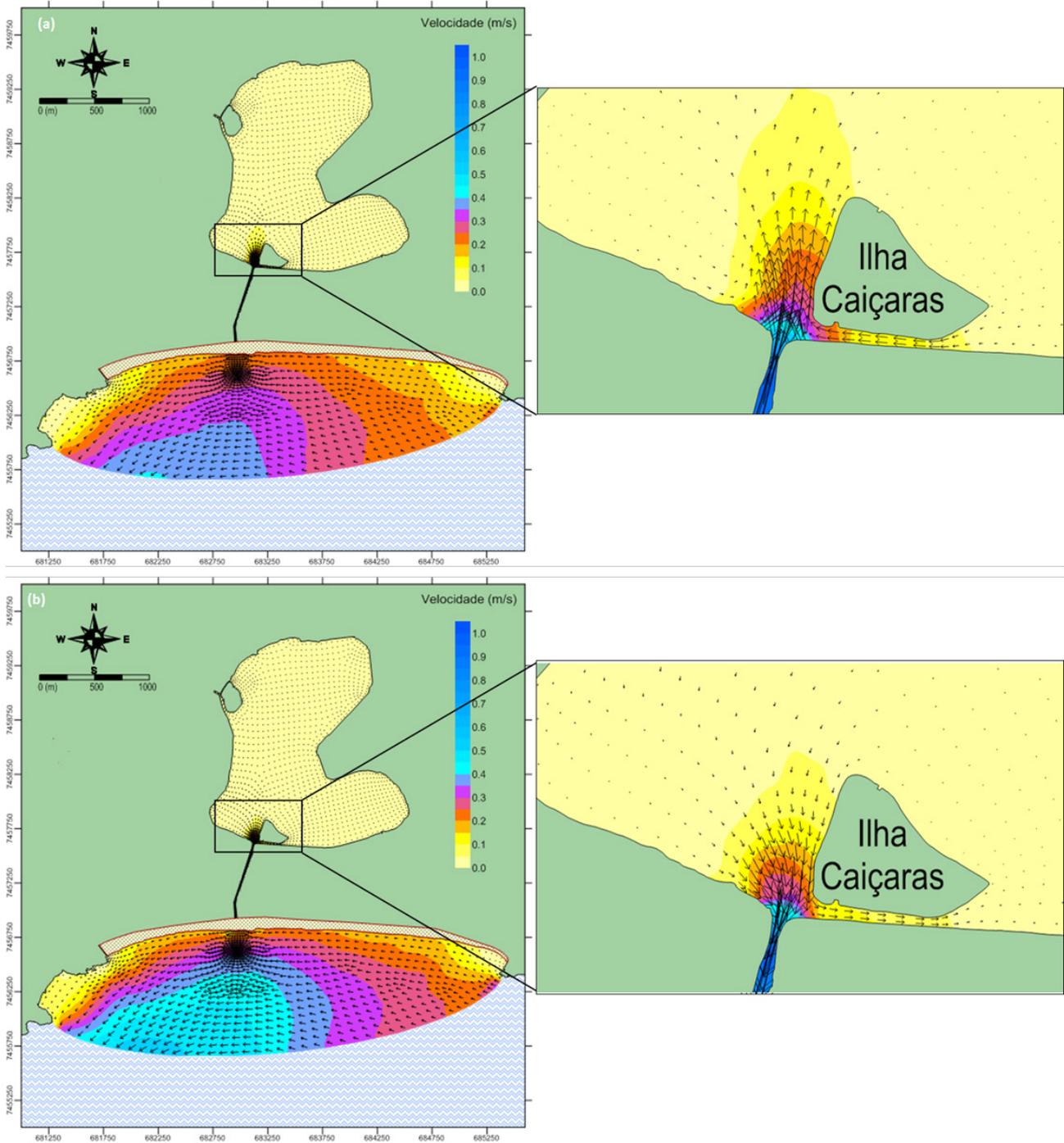


Figura 12. Exemplificação da distribuição espacial da circulação hidrodinâmica média na coluna d'água com sua intensidade da velocidade das correntes em metros por segundo em período de maré de sizígia na enchente (a) e vazante (b).

Lagoas-SW e SE apresentam valores a cima de 5 mg/L. No centro da lagoa apresentam valores entre 3 e 5 mg/L. Já no fundo da lagoa, onde estão localizadas as saídas da hípica, Vasco e Rebouças, registram os menores valores de OD (Figura 15).

A DBQ apresenta os maiores valores na estação Lagoa-NE, em torno de 7.5 mg/L. Já os menores valores são encontrados na estação Lagoa-SE. As outras estações apresentam seus valores de DBO entre as duas estações citadas anteriormente (Figura 16).

4. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na situação atual, a deficiente ligação da Lagoa Rodrigo de Freitas com o mar através do Canal do Jardim de Alah é resultante da obstrução frequente da respectiva embocadura, motivada pela deposição de areias movimentadas pela agitação marítima. Embora haja um grande esforço de limpeza desta zona do Canal, por dragagem mecânica localizada e (quase) permanente, ele não tem sido suficiente para controlar o assoreamento

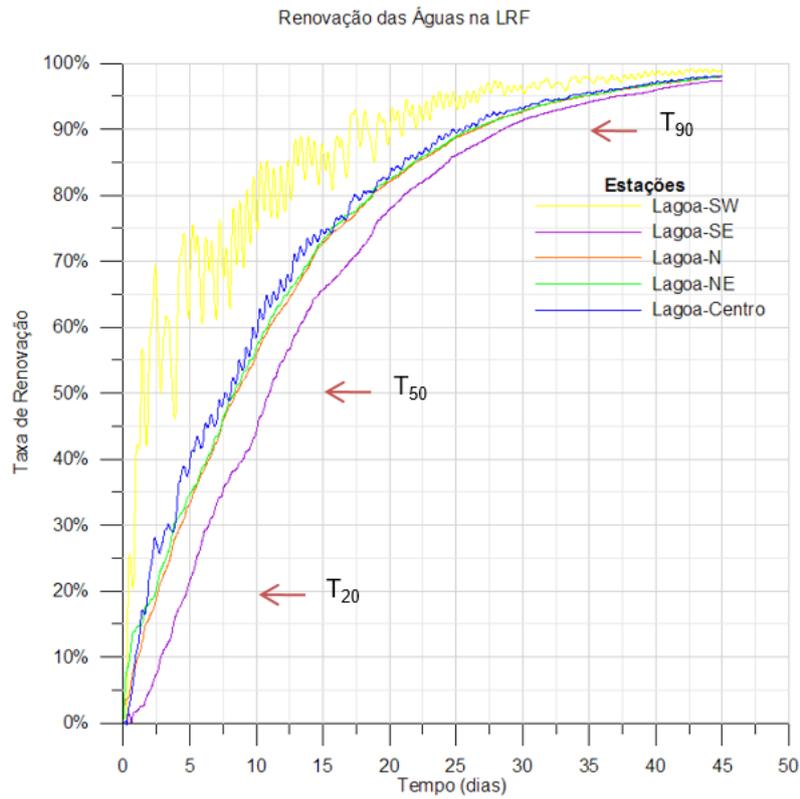


Figura 13. Prognóstico da taxa de renovação em porcentagem da Lagoa Rodrigo de Freitas no decorrer de 45 dias. Foram plotados os comportamentos nas estações de controle.

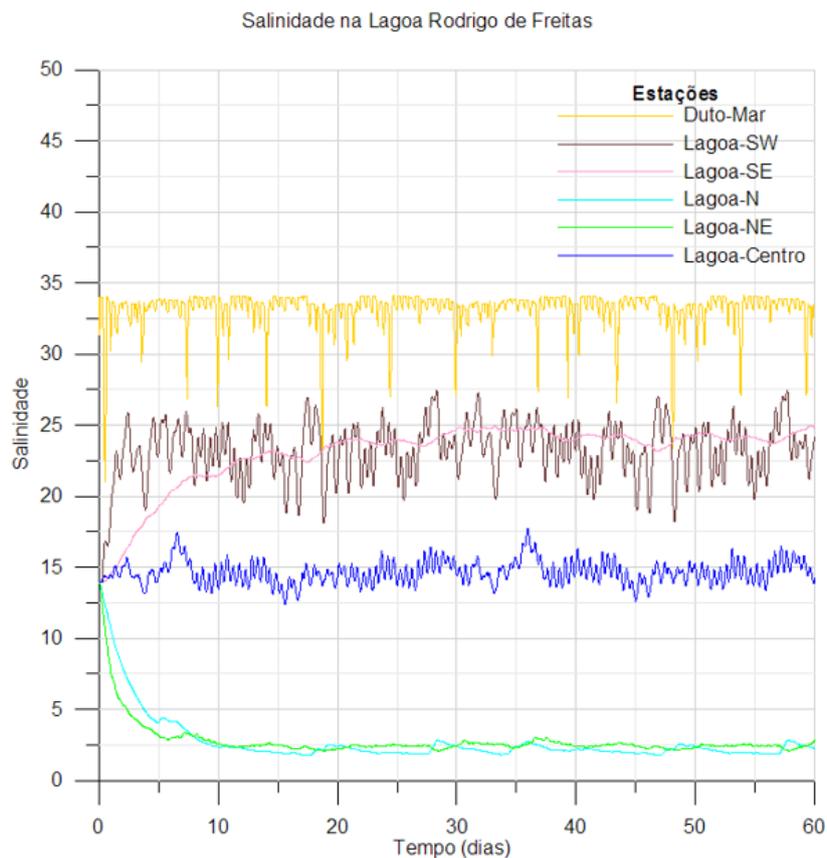


Figura 14. Prognóstico da distribuição da salinidade na Lagoa Rodrigo de Freitas no decorrer de 60 dias. Foram plotados os comportamentos nas estações de controle.

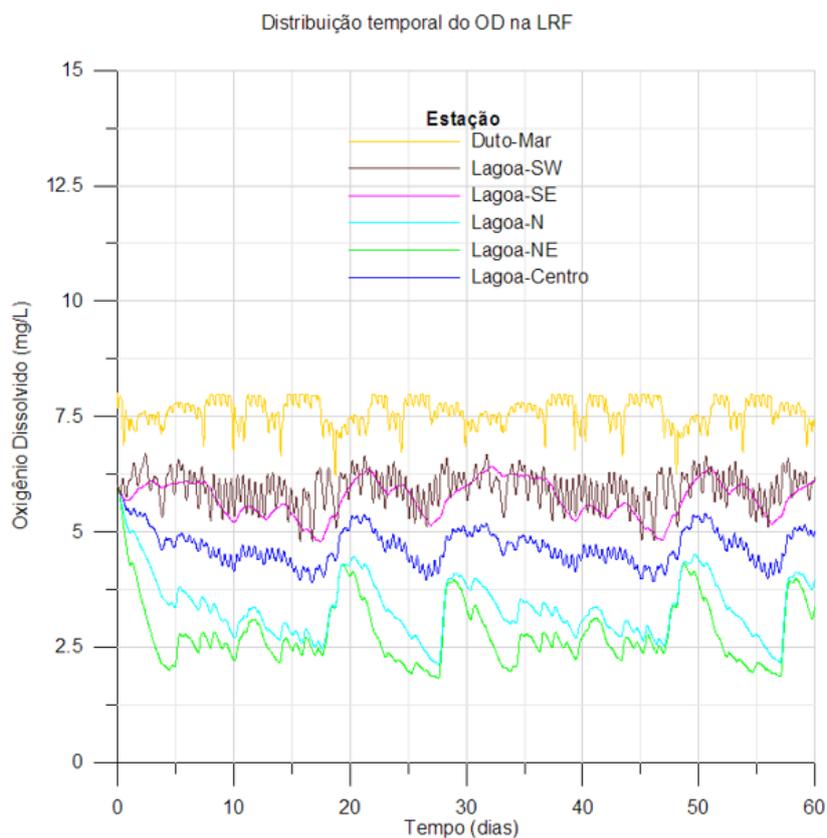


Figura 15. Prognóstico da distribuição do oxigênio dissolvido (OD) em mg/L (miligrama por litro) na Lagoa Rodrigo de Freitas no decorrer de 60 dias. Foram plotados os comportamentos nas estações de controle.

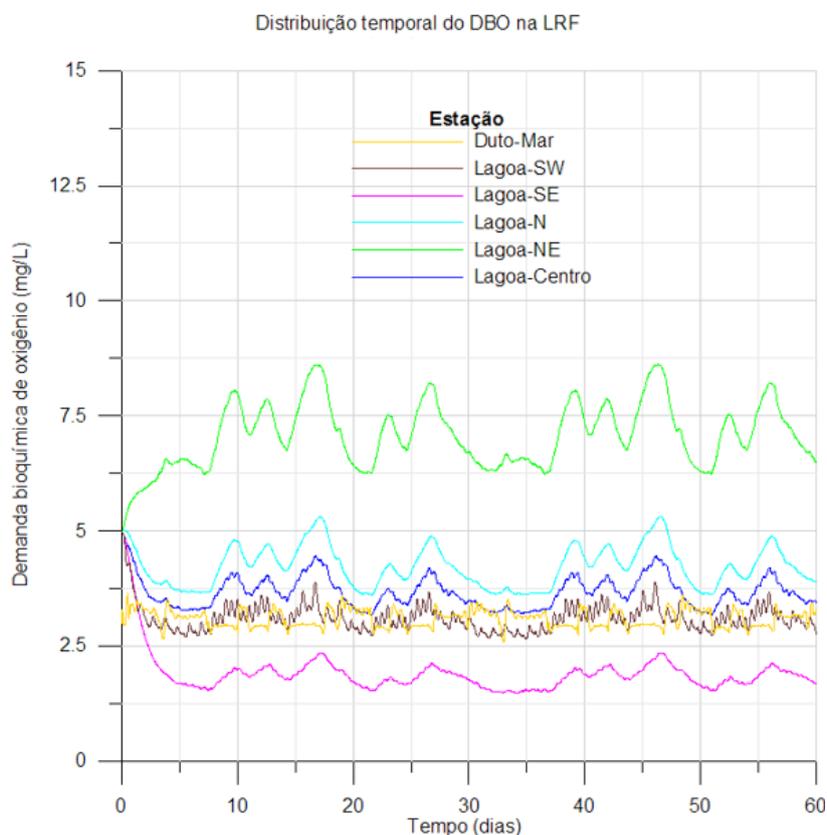


Figura 16. Prognóstico da distribuição da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em mg/L (miligrama por litro) na Lagoa Rodrigo de Freitas no decorrer de 60 dias. Foram plotados os comportamentos nas estações de controle.

do Canal ao longo da sua extensão até à Lagoa Rodrigo de Freitas. Como consequência, a troca de massas d'água entre a lagoa e o mar é deficiente, reduzindo a renovação das águas, o que repercute na degradação da qualidade da água (AMBIENTAL, 2002).

Foi verificado pelos resultados do modelo de circulação hidrodinâmica que as correntes na LRF continuariam com pequenas magnitudes. Aplicando um modelo bidimensional de transporte euleriano ao resultado hidrodinâmico, foi gerado o mapeamento do tempo de residência previsto após a implantação dos dutos afogados. Os modelos foram rodados até não haver mais locais com concentração superior a 10% da inicial. Com a análise dos resultados, o tempo de residência se mostrou variável na área da lagoa. Estima-se um tempo de residência de cerca de 20 a 30 dias para a lagoa como um todo. Levando em consideração efeitos tridimensionais, e o fato de a água do mar ser mais fria e salgada que as águas da lagoa, a renovação real seria mais rápida. Isso ocorreria porque águas mais frias e salinas nas marés enchentes iriam para o fundo, e nas vazantes as águas que sairiam seriam águas misturadas, menos salinas e mais quentes da lagoa. Portanto, haveria trocas mais efetivas devido à circulação residual por diferença de densidade que pelo fundo ocorreria no sentido do interior da lagoa e pelas camadas mais superficiais no sentido do Canal do Jardim de Alah. Desta forma, os dutos afogados tornariam a qualidade da água da lagoa melhor, reduzindo o tempo de residência, tendo em vista que, atualmente, a LRF tem sua comunicação com o mar bloqueada pelo assoreamento, sendo rompida esporadicamente ou necessitando de permanentes dragagens.

Dados de salinidades na LRF medidos nas décadas de 60, 70 e 80 mostram um padrão frequente de estratificação salina bem definido, com salinidades variando entre 15 e 23 numa camada superficial de ~ 1.5 m, e valores entre 19 e 31 na camada abaixo até ao fundo (LNEC, 2000). Segundo Rosman (2009), em fevereiro de 1996 houve uma súbita mudança no padrão de salinidades da LRF que persistiu pelo menos até 2000. Atualmente a lagoa é um sistema bem misturado, tanto vertical quanto horizontalmente. A salinidade média é da ordem de 14, ou seja, bem mais baixa do que a salinidade na zona costeira. O Canal Jardim de Alah apresenta grandes variações de salinidade ao longo da sua extensão, em particular quando permite a admissão de maré oceânica, com valores próximos da salinidade do mar na extremidade marítima (Soares *et al.*, 2012).

A gradação da salinidade foi percebida de forma

crescente em direção ao Canal Jardim de Alah e decrescente em direção à afluência dos rios Macacos e Cabeças junto da Ilha Piraquê e saída do túnel Rebouças. Após a simulação, foi observado que a LRF sofreria uma grande modificação em relação a esse parâmetro. A gradação da salinidade apresentada é tipicamente de sistemas estuarinos, o qual favorece a diversidade biológica. Vale a pena ressaltar que os resultados modelados são valores de salinidade médios na coluna de água. Contudo, efeitos tridimensionais causados por diferenças de densidade mostram na realidade uma situação de estratificação salina dinâmica da coluna d'água, com salinidades menores nas camadas superficiais e maiores no fundo, conforme Martins & Rosman (1999).

Através do balanço de massas de oxigênio dissolvido, o relatório LNEC (2000) propõe que na ausência da fonte de oxigênio oriunda da produção primária fotossintética, a LRF tenderá à hipoxia ou mesmo anoxia. Indicam também que quaisquer fatores que interfiram na produção fotossintética das algas podem resultar em desequilíbrios na disponibilidade de OD do sistema. O estudo considera ainda que, para atingir condições de equilíbrio mais estável em relação à oxigenação das águas, é necessária a redução do aporte de matéria orgânica oxidável. Porém, tal redução provavelmente resultará em diminuição na disponibilidade de nutrientes, contribuindo para a redução da produção autóctone e para uma situação de equilíbrio. Na simulação de OD constatou-se que a influência das águas mais poluídas do rio somente se faz sentir no entorno da Ilha do Piraquê e da saída Rebouças. Nessa área, o OD é da ordem de 3 mg/L no desemboque na lagoa, passando para valores maiores ao sul da referida ilha. A concentração de OD nas praias do Leblon e de Ipanema é da ordem de 6 mg/L, devido à saída das águas da lagoa. Esta influência é menor quanto mais se afasta da praia em sentido ao mar aberto, e quanto mais se afasta da boca do Canal do Jardim de Alah.

Nas simulações da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), após 10 dias, é claramente perceptível a influência do rio e da penetração da água do mar na lagoa. O rio traz uma concentração de DBO elevada (10 mg/L), tornando mais poluída a região do Piraquê, dessa forma o canal a oeste desta ilha apresenta concentrações até à ordem de 9 mg/L, ao sul e a leste da ilha as concentrações são em média 5 mg/L. Vale ressaltar que as estações Lagoa-NE e Lagoa-SE apresentaram comportamento opostos: a primeira estação apresentou valores crescentes (oscilando com a maré) no decorrer dos 60 dias; a outra estação contudo apresentou

valores decrescentes, também variando com a maré, para os valores de DBO (Figura 16). Após 60 dias de simulação, a diferença mais marcante, assim como o OD, foi a grande influência das águas do rio que chegam à Ilha do Piraquê, aumentando a concentração de DBO no entorno desta ilha. Essa situação se prolonga para o noroeste da lagoa. De modo geral, a parte central apresentou valores de DBO em torno de 4 mg/L; e a parte sul em torno de 3 mg/L. Também foi observado que em marés enchentes há entrada de água marinha trazendo concentrações de DBO um pouco menores.

Logo após a abertura dos dutos haverá alterações iniciais e transientes das variáveis ambientais e bióticas. Esses efeitos podem ser positivos ou negativos ao ambiente. A seguir serão apresentados alguns desses efeitos:

O *aumento da DBO* para oxidação da biomassa morta e a consequente disponibilização de nutrientes via decomposição estarão relacionados às alterações ambientais que ocorrerão na lagoa durante o período inicial de mudança dos padrões de salinidade e circulação. As características biológicas das comunidades aquáticas que sofrerão estes impactos não possibilitam a execução de ações mitigadoras. Contudo esse aumento da DBO será por um período, pois, após o consumo da matéria orgânica disponível em excesso, esse parâmetro entraria em equilíbrio.

Valores de OD, abaixo da referência da legislação pertinente, nas regiões próximas às desembocaduras de rios (Ilha Piraquê e saída Rebouças) somente atingirão os valores estabelecidos pela legislação se os rios em questão forem tratados e não chegarem poluídos à lagoa (atividade em andamento, pelo projeto Lagoa Limpa). Caso isso não ocorra, a abertura via dutos afogados somente amenizará os problemas relacionados ao OD.

Uma observação importante a ser feita é que está sendo realizada uma revisão do sistema de esgotamento sanitário local, pelo projeto Lagoa Limpa, o qual está promovendo: filmagem das galerias de águas pluviais (em andamento atualmente), limpeza da rede de esgotamento sanitário (em andamento atualmente), obras de melhoria do sistema de esgoto (em andamento atualmente) e a construção do Centro de Controle Operacional de Esgotos – CCO. Com essas intervenções, a descarga fluvial na LRF apresentará valores de OD e DBO distintos dos modelados, que seguiram os valores do EIA/RIMA 2002. Dessa forma, poderemos esperar valores mais altos de OD próximo à descarga fluvial assim como menores valores DBO na mesma área. O projeto Lagoa Limpa tem como objetivo contribuir para a recuperação

ambiental da lagoa e a melhoria da qualidade de suas águas, implementando medidas estruturantes e buscando desenvolver soluções para reverter o processo de degradação.

A *disponibilização de metais pesados* presentes no sedimento resultante da alteração dos padrões de salinidade apresentará efeitos de importância ambiental, econômica e social, uma vez que podem implicar em alterações nas comunidades aquáticas e bioacumulação de metais pesados nos peixes. Este último facto, se confirmado, é de extrema relevância, pois pode implicar em contaminação do pescado produzido na lagoa. Contudo, os processos que podem resultar na biodisponibilização de metais pesados do sedimento para a biota aquática não podem ser evitados. Assim, faz-se necessário o monitoramento da presença destes elementos nas águas e sedimentos e na ictiofauna quanto à possível contaminação.

A *redução da biomassa fitoplanctônica* resultante das alterações no padrão de circulação do sistema lagunar e o tempo de residência da água, assim como as alterações na estrutura da comunidade fitoplanctônica resultantes da mudança do padrão de salinidade podem vir a ser um impacto positivo. Contudo, deve-se ficar atento a essas mudanças na estrutura da comunidade, pois podem resultar no aparecimento de espécies potencialmente nocivas ou tóxicas. Sendo assim, seria necessário o monitoramento da comunidade fitoplanctônica.

O *aumento da diversidade biológica e aumento da biomassa*, resultantes da alteração do padrão de salinidade, são impactos positivos que não precisam ser mitigados.

A *mudança no ciclo de vida da comunidade de peixes* existente, resultante da alteração do padrão de salinidade, embora possa ter profundas implicações no ecossistema do ambiente, não pode ser atenuado, uma vez que os processos envolvidos não são totalmente conhecidos e não podem ser controlados. Porém, devido à sua importância, deverá ser realizado o monitoramento da ictiofauna. O presente estudo apontou que a proposição de uma ligação permanente entre a Lagoa Rodrigo de Freitas e o mar cumpre o objetivo de mitigar os problemas ambientais relacionados ao oxigênio dissolvido na coluna d'água e de sanar de modo definitivo os seguintes problemas ambientais: *má qualidade de água* em função do excessivo estoque de nutrientes na LRF que se acumulam pelo facto de o sistema atual não exportar em taxas suficientes os nutrientes que recebe; o contínuo *processo de assoreamento do Canal do Jardim de Alah*, que acarreta em altos custos de manutenção de sua capacidade de extravasamento e garantia

da macrodrenagem da bacia da LRF; a *perda das características estuarinas* em função da estagnação e uniformização das águas da Lagoa, acarretando em biodiversidade reduzida e má qualidade ambiental; e a LRF interligada permanentemente ao mar voltaria a apresentar padrões de graduação de salinidade típica de sistemas estuarinos, o que levaria a significativo *aumento da diversidade biológica*. Inicialmente poderão ser observadas consequências adversas no ambiente, contudo, em questão de meses, haveria uma mudança radical na fauna e flora da LRF, que apresentaria melhoria da qualidade da água, aumento da diversidade de peixes e redução dos riscos de mortandade e recuperação de espaços aquáticos da Lagoa.

BIBLIOGRAFIA

- Alves, Daniella Tancredo de Matos; Argento, Mauro Sérgio Fernandes; Cruz, Carla Bernadete Madureira; Zee, David - *Qualidade Ambiental da Lâmina D'água da Lagoa Rodrigo de Freitas - RJ Subsídios aos Estudos de Impactos Ambientais em Lagoas Costeiras*. INPE, 1998.
- AMBIENTAL - EIA/RIMA - *Solução Integrada de Reabilitação Ambiental da Lagoa Rodrigo de Freitas, Canal do Jardim de Alah e Praias do Arpoador, Ipanema e Leblon*. Rio de Janeiro: FEEMA, 2002.
- Brito, I. M.; Lemos, E. E. - *Evolução geológica e fauna da lagoa Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro. Anais da Academia Brasileira de Ciências*. Vol. 54. (1982). p. 143-164.
- FEEMA - *Qualidade da água da Lagoa Rodrigo de Freitas. Relatório de resultados obtidos através de campanhas de monitoramento e inspeções realizadas no período de Fevereiro/2000 a Maio/2002*. (2002). p. 40.
- LNEC - *Lagoa Rodrigo de Freitas e Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador: Solução Integrada de Reabilitação Ambiental*. Lisboa: 2000. ISBN/ISSN:
- LNEC - *Lagoa Rodrigo de Freitas e Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador: Solução Integrada de Reabilitação Ambiental*. Lisboa: 2003.
- Maciel, Gabriela Leite Roquette - *Análise de Dados Hidrodinâmicos e Estratificação na Lagoa Rodrigo de Freitas, RJ: Relação Com a Concentração de Oxigênio Dissolvido*. Rio de Janeiro: COPPE / UFRJ, 2007.
- Marotta, Humberto; Ricci, Renata Maria Pereira; Sampaio, Pedro Lima; Melo, Pedro Puciarelli de; Enrich-Prast, Alex - *Variações de curto prazo do metabolismo e da pCO_2 na lagoa rodrigo de freitas: elevado dinamismo em um ecossistema tropical urbano*. *Oecologia Australis*. Vol. 16. n.º 3 (2012). p. 391-407.
- Martins, R.P.; Rosman, Paulo Cesar Colonna - *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 4*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999. - Modelo 3D para corpos de água com densidade variável via diferenças finitas.
- Oliveira, A.; Fortunato, A. - *Lagoa Rodrigo de Freitas e Praias de Leblon, Ipanema e Arpoador: Solução Integrada de Reabilitação Ambiental*. Lisboa: 2000.
- Pinto, Antônio Carlos Barreto - *Modelo Unidimensional para Simulação de Cheias em Rios e Áreas Urbanas*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007.
- RIOÁGUAS - *Plano de contingências e monitoramento da Lagoa Rodrigo de Freitas (PCMLRF)*. Rio de Janeiro: Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro, 2010.
- Rosman, P.C.C. - *Estudos de hidrodinâmica ambiental para ligação da Lagoa Rodrigo de Freitas ao mar via dutos afogados, RJ*. Rio de Janeiro: Fundação Coppetec, 2009. ISBN/ISSN: Projeto PENO11113
- Rosman, P.C.C.; Neves, C.F.; Melo, E. - *Solução Conjunta dos Problemas de Erosão na Praia de Ipanema-Leblon e Qualidade de Água na Lagoa Rodrigo de Freitas*. Rio de Janeiro-RJ, Brasil: COPPETEC, 1992.
- Rosman, Paulo Cesar Colonna - *Referência Técnica do SisBaHiA*. (2010). p. 209.
- Rosman, Paulo Cesar Colonna - *Ligação Lagoa-Mar, um necessidade*. *Oecologia Australis*. Vol. 16. n.º 3 (2012). p. 651-693.
- Silva, Agenor Cunha da - *Rodrigo de Freitas - Preservação Ambiental de um Cartão Postal*. Rio de Janeiro: 2010. Disponível em WWW: <<http://www.biologo.com.br/oceano/oceano3.htm>>.
- Soares, Maurício F.; Domingos, Patrícia; Soares, Fátima de Freitas Lopes; Fidalgo, Leonardo; Telles, Rodrigues - *10 anos de monitoramento da qualidade ambiental das águas da Lagoa Rodrigo de Freitas*. *Oecologia Australis*. Vol. 16. n.º 3 (2012). p. 581-614.
- Torres, J. M. - *Lagoa Rodrigo de Freitas*. Rio de Janeiro: Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro, 1990.