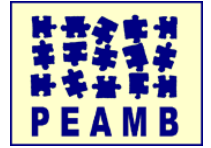




Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente
Mestrado em Engenharia Ambiental



METODOLOGIA PARA ESTUDO DA RESSUSPENSÃO DE SEDIMENTOS NA
LAGOA RODRIGO DE FREITAS

Erica Kaippert

Orientadora: *Thereza Christina de Almeida Rosso*

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2004

METODOLOGIA PARA ESTUDO DA RESSUSPENSÃO DE SEDIMENTOS NA LAGOA
RODRIGO DE FREITAS

Erica Kaippert

Trabalho Final submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada por:

Prof^a. Thereza Christina de Almeida Rosso, D.Sc. - Presidente
PEAMB/UERJ

Prof. Gandhi Giordano, D.Sc.
PEAMB/UERJ

Prof. Renato Parkinson Martins, D.Sc.
PETROBRÁS/CENPES

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2004

KAIPPERT, ERICA

Metodologia para Estudo da Ressuspensão de Sedimentos na Lagoa Rodrigo de Freitas [Rio de Janeiro] 2004.

ix, 55 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da Poluição Urbana e Industrial, 2004.)

Dissertação - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

1. Ressuspensão de sedimentos
 2. Modelagem matemática
 3. Tensão de cisalhamento
- I. FEN/UERJ II. Título (série)

Para os meus amados pais Arnaldo (*in memória*) e
Vera por terem me ensinado que viver é aprender.

AGRADECIMENTOS

Especialmente ao Professor Renato Parkinson Martins pelo desprendimento nos conhecimentos transmitidos, pela perseverança e cuja dedicação a este trabalho tornou possível a sua realização.

À minha orientadora Professora Thereza Christina de Almeida Rosso pelo apoio indispensável à concretização deste trabalho, otimismo e confiança.

Aos meus amados irmãos Bruno e Enio por acreditarem incondicionalmente que seria possível desenvolver este trabalho.

Ao meu querido Francisco pelo incentivo e carinho.

Aos amigos Alexandre e Gabriela pela curiosidade por este trabalho.

Aos amigos e professores do mestrado pela solidariedade e pelos bons exemplos de profissionalismo e caráter.

Aos meus companheiros de trabalho José Luiz, Ivana, Leite e Ricardo pela paciência e compreensão.

Ao Odin pela sua alegria contagiante.

RESUMO

Metodologia para Estudo da Ressuspensão de Sedimentos na Lagoa Rodrigo de Freitas

Os níveis de degradação ambiental das lagoas costeiras brasileiras demonstram a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a preservação, o uso racional e a recuperação destes ecossistemas onde a compreensão dos fenômenos que aí ocorrem é fundamental. Neste contexto, este trabalho se ateve ao entendimento dos padrões de circulação, transporte e ressuspensão de sedimentos nos ambientes lagunares para o estudo das tensões de cisalhamento na camada superficial de lodo presente no fundo da Lagoa Rodrigo de Freitas através da aplicação de um modelo matemático composto por equações que permitem o cálculo de parâmetros que descrevem o padrão de ondas provocado pelo vento sobre a superfície do corpo d'água e das variáveis que determinam o movimento das partículas no meio, em condições de contorno pertinentes. Nos sedimentos ocorrem processos químicos, físicos e/ou biológicos, que influenciam o metabolismo de todo o sistema e através de sua composição química e biológica pode-se determinar a evolução histórica dos ecossistemas aquáticos e terrestres adjacentes e avaliar a intensidade e as formas de impactos a que estiveram ou estão submetidos os ecossistemas em questão. Os modelos matemáticos são ferramentas capazes de auxiliar a gestão da qualidade da água, na medida em que permitem a previsão dos impactos ambientais que poderão ocorrer nos ecossistemas.

Palavras-Chave: Ressuspensão de sedimentos, modelagem matemática, tensão de cisalhamento.

ABSTRACT

Methodology for the study of Rodrigo de Freitas Lagoon's resuspension of sediments

This dissertation presents a methodology for the study of Rodrigo de Freitas Lagoon's resuspension of sediments. The level of the environmental degradation of the Brazilian coast lagoons show the necessity of developing some search that make possible the preservation, the rational use and the recovery of these ecosystems, where the comprehension of phenomena that occur there is essential. In this context, this study focuses on the understanding of process that generates shear stress on mud top layer present at the bottom of Rodrigo de Freitas Lagoon, through the employment of a mathematical model composed by equations that permit the calculus of parameters, which describe the behavior of waves generated by wind on the water body surface and the variables that determine the particles movement in pertinent contour conditions. The resuspension of sediments and its availability for column water influence the metabolism of all ecosystem changing the quality of water. The mathematical models are tools that help the water quality control because they allow the prediction of environmental impacts that can happen in the lagoons.

Key words: resuspension of sediments, mathematical model, shear stress.

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1. Definição dos termos elementares de uma onda senoidal progressiva (CERC, 1975)	31
Figura 5.2. Deslocamento de uma partícula em águas rasas (CERC, 1975)	34
Figura 5.3. Relação entre a tensão crítica de cisalhamento e a viscosidade do sedimento para dois tipos de lodo (Otsubo & Muraoka, 1988)	38
Figura 6.1. Batimetria da Lagoa Rodrigo de Freitas e representação da malha numérica no plano x - y (coordenadas em metros)	40
Figura 6.2. Pistas para vento a 45° em metros	44
Figura 6.3. Pistas para vento a 180° em metros	45
Figura 6.4. Alturas significativas de onda para vento a 45° em metros	46
Figura 6.5. Alturas significativas de onda para vento a 180° em metros	47
Figura 6.6. Períodos significativos de onda para vento a 45°	48
Figura 6.7. Períodos significativos de onda para vento a 180°	49
Figura 6.8. Tensões de cisalhamento para vento a 45°	50
Figura 6.9. Tensões de cisalhamento para vento a 180°	51
Figura 6.10. Tensões de cisalhamento para vento a 45° , intensidade de 10 m/s e com variação do nível d'água	52
Figura 6.11. Tensões de cisalhamento para vento a 180° , intensidade de 10 m/s e com variação do nível d'água	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. ÁREA DE ESTUDO: DESCRIÇÃO DA BACIA DA LAGOA RODRIGO DE FREITAS	05
2.1 Evolução de suas fronteiras	05
2.2 Hidrografia	06
2.3 Bacias de Drenagem	07
2.4 Ocupação Urbana	10
2.5 Inter-relação dos Sistemas de Saneamento da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas	11
3. ASPECTOS DA QUALIDADE DA ÁGUA NA LAGOA RODRIGO DE FREITAS	14
3.1 Introdução	14
3.2 Caracterização da qualidade da água na área de interesse	15
4. DINÂMICA DE SEDIMENTOS EM LAGOAS	19
4.1. Introdução	19
4.2. Processo de formação de sedimentos, deposição e ressuspensão	20
4.3. Efeito da ressuspensão de sedimentos na qualidade da água	27
5. MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA DA RESSUSPENSÃO DE SEDIMENTOS DO FUNDO DE CORPOS D'ÁGUA RASOS	29
5.1. Introdução	29
5.2. Geração de ondas pelo vento	29
6. APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO À LAGOA RODRIGO DE FREITAS	39
6.1. Características físicas do domínio e parâmetros do modelo	39
6.2. Simulação numérica para cálculo das tensões críticas de cisalhamento	39
6.3. Resultados dos casos estudados	41
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

As lagoas costeiras proporcionam serviços de grande importância para o homem. Muitos destes serviços fazem parte do dia a dia de milhares de pessoas e constituem o elemento indispensável para a manutenção da qualidade de vida. Entre os serviços mais relevantes destacam-se: área de lazer de excelente qualidade, controle de inundação, pesca, valorização imobiliária das áreas do entorno, beleza cênica e harmonia paisagística, valorização turística da região, entre outros.

A manutenção do equilíbrio ecológico de lagos e lagoas representa, portanto, ganho de capital direto, tanto para os proprietários de edificações localizadas nas suas proximidades como para diferentes segmentos da sociedade, podendo ser beneficiados com a manutenção da qualidade de vida, do turismo e ecoturismo.

A eficiência e eficácia dos serviços de saneamento se fazem necessários para que seja possível aos usuários/beneficiários ter confiabilidade nas políticas públicas de saneamento e garantia de uso correto dos bens e investimentos públicos. Esta condição é indispensável para que a sociedade possa, através de uma ação integrada local que contempla ações educativas e participativas, garantir a continuidade dos programas ambientais, assegurar a biodiversidade e seu equilíbrio dinâmico. Os sistemas de saneamento são elementos básicos e fundamentais para a estruturação das cidades. A superação de sua defasagem e dificuldades operacionais, dentro do binômio indissociável, quantidade-qualidade, é imprescindível para que as cidades cumpram a função social. A disseminação da pobreza pelo tecido urbano dificulta a preservação dos recursos naturais e dos sistemas artificiais de proteção, de tal forma que a miséria pode ser considerada um dos maiores agressores do meio ambiente. A solução técnica de qualquer sistema que implique em desenvolver o saneamento ambiental requer em primeira e em últimas instâncias de soluções sócio-econômica-políticas relativas a emprego e renda.

Desta forma, os impactos ambientais na Lagoa Rodrigo de Freitas geram também impactos econômicos. Dentre os impactos ambientais, destacam-se a aceleração do processo de eutrofização devido ao aporte constante de matéria orgânica, *bloom* de algas favorecendo colapsos mais frequentes no equilíbrio do ecossistema lagunar, comprometimento da capacidade de resiliência do corpo lagunar, aumento da frequência de ocorrência de morte de peixes. O aporte de esgotos com comprometimento da qualidade da água contribui para o

aumento de sedimentos do fundo, agravando o processo de assoreamento nas margens, prejudicando ainda mais a precária circulação e a diminuição do espelho d'água. A formação de trechos pantanosos possibilita a proliferação de vetores com aumento de doenças relacionadas a esses vetores. Sob o ponto de vista econômico-social, observam-se alterações no bem-estar da população usuária, alterações na oferta e demanda de bens e serviços envolvidos com as atividades de lazer, moradia, produção e turismo, alterações nos gastos e arrecadações pelo setor público relacionadas com impostos, contribuições trabalhistas e gastos com pessoal, alterações nos gastos e arrecadações relacionados com a mortandade de peixes (equipamentos, monitoramento e limpeza). Assim sendo, as principais conseqüências para a região em função da permanência do nível de impactos observados atualmente são a redução da demanda de bens e serviços, o aumento da degradação visual do espelho d'água e entorno associado às alterações de cor da água, resíduos sólidos flutuantes e trechos assoreados. São conseqüências também, a contaminação do lençol freático frente à idade e ausência de manutenção preventiva da rede de esgotamento sanitário, a depreciação do valor dos imóveis, a deterioração dos rios e canais que funcionam como redes de drenagem naturais. Estas conseqüências promovem a deterioração da imagem do Rio de Janeiro, no que se refere às políticas ambientais e de preservação do meio ambiente e ao comprometimento com a qualidade de vida.

Diante dos níveis elevados de degradação ambiental das lagoas costeiras brasileiras, torna-se urgente a realização de pesquisas que possibilitem a preservação, o uso racional e a recuperação destes ecossistemas. Para tal, se faz necessária a multidisciplinaridade, interdisciplinaridade e transdisciplinaridade de todos os setores da ciência para os estudos e as intervenções integrando as diversas ações setoriais.

O ecossistema lagunar está inserido concomitantemente na gestão hídrica de ambientes costeiros e interiores, devendo estar contemplado em políticas de usos múltiplos dos solos e dos recursos hídricos.

O estudo ecológico é um ferramental necessário para a compreensão dos níveis hierárquicos da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, das definições das variáveis determinantes e da definição de suas condições de contorno e a conseqüente troca de materiais, energias e informações entre os componentes bióticos e abióticos que a constituem. Suas especificidades demonstram a importância não só do seu interior como principalmente o cuidado com os ambientes de entrada e saída de seu ecossistema para o perfeito entendimento de seu balanço hídrico e energético.

As causas da diminuição da concentração de oxigênio dissolvido na lagoa, que provocam a mortandade de peixes, são complexas, mas podem ser destacados alguns fatores intervenientes relevantes. A intervenção humana através do lançamento de esgotos é, sem dúvida nenhuma, o mais óbvio e indiscutível, uma vez que a carga orgânica lançada na lagoa por si só acelera as reações aeróbias que consomem oxigênio. Nesse sentido, há que se destacar os esforços que vêm sendo feitos para a melhoria do sistema de saneamento da bacia hidrográfica da lagoa, através de estudos diagnósticos e obras de infra-estrutura, como a da galeria de cintura, que, porém, ainda são insuficientes para conter os lançamentos clandestinos de esgoto.

Além dos fatores antropogênicos, porém, merecem também destaque fatores naturais, que são agravados pela ação antrópica. A proliferação excessiva de microalgas é um exemplo desses fatores naturais, que atua tanto através do consumo de oxigênio pelas algas no período noturno, quanto pela reação aeróbia de degradação da população que morre após intensa proliferação, e é fortemente acentuado pela presença de matéria orgânica originária do esgoto doméstico. O aumento da temperatura da água é outro fator natural que acentua o problema de qualidade das águas, uma vez que o limite de saturação de gases na água é inversamente proporcional à temperatura e, portanto, quanto maior a temperatura, menor a concentração máxima de oxigênio que a água consegue manter dissolvida (Esteves, 1998).

Outro processo que proporciona o consumo excessivo de oxigênio na lagoa é a disponibilização para a coluna d'água do material presente no fundo da lagoa, composto de matéria orgânica e sedimentos finos, usualmente denominado lodo ativo. Este material é originado da drenagem da bacia hidrográfica, dos próprios organismos que habitam a lagoa e do lançamento de esgotos domésticos. Como as camadas mais profundas da lagoa se encontram freqüentemente sob condições anóxicas, a matéria orgânica depositada no fundo não sofre decomposição aeróbia e fica sujeita a processos anaeróbios, que promovem uma degradação muito mais lenta e, dessa forma, é comum a presença de matéria orgânica em altas concentrações nessas regiões. No entanto, os processos responsáveis pela formação do lodo não serão interrompidos e mais cedo ou mais tarde, o lodo ativo estará presente em quantidades nocivas. Considera-se, portanto, que seja extremamente importante compreender os processos de formação e ressuspensão desse material, de forma que se possa planejar ações que contenham os impactos por ele causados.

Nesse contexto, o trabalho proposto pretende dar uma contribuição à compreensão do processo de ressuspensão do lodo ativo do fundo da lagoa - ao qual estão associados gases e matérias orgânicas que proporcionam a diminuição do oxigênio dissolvido na água através do

estudo do efeito do vento na geração de ondas e as conseqüentes tensões de cisalhamento atuantes sobre a superfície do fundo. Para tal foi desenvolvido um modelo matemático que calcula o período e altura das ondas geradas pelo vento, proporcionando o cálculo das tensões de cisalhamento no fundo, a partir das quais se pretende identificar as condições que proporcionam a desestabilização da camada do fundo e, conseqüentemente, a ressuspensão do lodo para a coluna d'água.

2. ÁREA DE ESTUDO: DESCRIÇÃO DA BACIA DA LAGOA RODRIGO DE FREITAS

2.1. Evolução de suas fronteiras

A cidade do Rio de Janeiro, de forma simplificada pode ser descrita como um terreno de alto grau metamórfico, constituído de vários tipos de gnaisses, cujo relevo fica caracterizado por escarpas abruptas e vales profundos, cujas planícies costeiras tiveram formação a partir do último período glacial, a cerca de 10 mil anos, em função da variação do nível do mar, e apresentam uma fina sucessão de sedimentos marinhos e fluviais inconsolidados, principalmente areias e lamas.

As partes mais elevadas da Serra da Carioca, que abrangem os maciços costeiros do Morro do Cantagalo, Cabritos e Pedra do Arpoador, são formadas por Gnaiss Facoidal, bem como a base do Morro Dois Irmãos. A parte oeste da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas é formada por biota-gnaisses e kingizitos.

A paisagem litorânea do Rio de Janeiro é produto das mudanças do nível do mar em relação à costa, vinculadas aos processos de ajustamento morfológico ao nível do mar pós-glacial (Muehe, 1995). Segundo Muehe & Correa (1989), a migração dos cordões arenosos em direção ao continente, até a posição atual, em consonância com o nível do mar, formaram os cordões arenosos atuais.

Segundo Muehe (1995), a formação das lagunas costeiras do litoral carioca se dá devido à migração do cordão litorâneo para sua nova posição de equilíbrio com o nível do mar, se posicionando entre o mar e a planície costeira, que é posteriormente inundada por ocasião de uma ligeira elevação do nível do mar, formando dessa maneira, a laguna costeira. Lagunas costeiras, como a Lagoa Rodrigo de Freitas, tiveram sua origem no afogamento de antigas bacias fluviais (Amador, 1997), que resultaram em enseadas, baías, estuários e braços de mar, que foram sendo posteriormente barrados por cordões arenosos litorâneos (restingas), gerados pelos movimentos regressivos-transgressivos do mar, que tiveram seu fechamento pelo desenvolvimento de cordões arenosos.

A Lagoa Rodrigo de Freitas ora se comporta como uma típica laguna costeira por ser um corpo d'água ligado ao mar por fluxo e refluxo de água através da abertura do Canal do Jardim de Alah, ora é uma lagoa quando se isola do mar, sem refluxo. Com pouca semelhança com o sistema aquático natural original, sua evolução natural foi uma enseada aberta para o mar, até o fechamento da orla com a formação da restinga frontal, a qual se estendeu da Ponta

do Arpoador à Ponta do Vidigal, abrangendo os atuais bairros de Ipanema e Leblon. Segundo relato do historiador Noronha Santos, em 1900, a Lagoa limitava-se à base do Morro do Corcovado e Dois Irmãos, com um banco de areia que a separava do oceano.

Antes da chegada dos portugueses ao Brasil, e onde hoje estão localizados os bairros de Copacabana, Ipanema, Leblon, Lagoa, Humaitá, Jardim Botânico e Gávea, a população que ali residia era indígena, da tribo dos Tupinambás, onde viviam há mais de quatro mil anos, sem causar danos ao meio ambiente e aos ecossistemas característicos da região. Após a chegada dos portugueses, a colonização e a nova ordem social provocaram guerras, doenças e escravidão, e também a disputa pelas terras em volta da laguna, gerando os primeiros sintomas de desequilíbrio do sistema ecológico.

Visando ampliar a produção de cana de açúcar, que já era bastante desenvolvida na Bahia e em Pernambuco, os portugueses partiram para a conquista de terras planas ou com pouca declividade para expandir a monocultura de cana de açúcar e o local escolhido foi a região ao redor da Lagoa. Para isso, começaram a aterrar as bacias de acumulação, abrir trilhas nas abas das montanhas, modificar e entulhar os leitos dos rios e riachos.

Ao longo dos séculos XVIII, XIX e XX, continuaram ocorrendo sucessivos aterros. O processo de urbanização da cidade do Rio de Janeiro modificou por completo as características da Lagoa, devido aos sucessivos aterros que se deram às suas margens, diminuindo a área ocupada pelo espelho d'água, para dar lugar a novos equipamentos urbanos. Estima-se que 1/3 da área total da lagoa tenha sido aterrada, descaracterizando seu entorno devido a perda da vegetação original e grande parte da fauna. A rede de drenagem também sofreu modificação, devido às canalizações de rios e retificações de canais, alterando com isso, a área de contribuição da bacia. A medida que a densidade urbana aumentou, o despejo de esgoto e lixo tornou-se maior e a qualidade dos sedimentos que chegavam a Lagoa também piorou. (Ambiental, 2002)

Na década de 1940, quando teve início a urbanização nas imediações da Lagoa, os problemas sanitários foram evidenciados, com uma tendência nítida de agravamento.

2.2. Hidrografia

A bacia hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas é formada basicamente pelos rios Cabeças, Macacos e Rainha que desembocam na Lagoa através do canal da rua General Garzon. A lagoa é circundada por uma área altamente urbanizada que propicia a chegada às suas águas, por meio dos rios tributários, de uma carga poluidora considerável. Também é significativa a contribuição das galerias de águas pluviais contaminadas que deságuam na

Lagoa. Embora as águas da Lagoa continuem predominantemente salobras, atualmente constata-se uma influência marinha menor do que as registradas anteriormente, devido, possivelmente, ao grau de assoreamento mais intenso do Canal do Jardim de Alah. Por outro lado, observa-se maior aporte de água doce proveniente do extravasamento dos rios tributários (Macacos e Cabeça).

A bacia hidrográfica da área de influência da Lagoa Rodrigo de Freitas, localizada na zona sul da cidade do Rio de Janeiro, é delimitada ao norte pela Serra da Carioca e ao sul pelo oceano Atlântico, e pode ser dividida em dois compartimentos geomorfológicos distintos, que são: o Maciço Costeiro, composto pelas encostas que drenam os rios que descem do Maciço da Tijuca, e a Planície Costeira, área que vai do sopé das encostas do maciço até o mar. A bacia hidrográfica abrange os bairros de Ipanema, Lagoa, Humaitá, Jardim Botânico, e Gávea, e drena as águas da vertente sudeste da Serra da Carioca, com uma área total de 23,57 Km².

Os divisores de drenagem que limitam a bacia vão do Arpoador, passando pelos cumes dos morros dos Cabritos, e Saudade, até os morros do Corcovado, Alto do Sumaré, Pico da Carioca, Morro do Queimado, passando ainda pela Mesa do Imperador, Morro Dois Irmãos, o Alto do Leblon e voltando até a praia.

O levantamento batimétrico da Lagoa mostra que esta apresenta profundidades da ordem de 3 a 4 metros em quase toda sua extensão, sendo suas margens pouco profundas. Nas extremidades sudoeste e sudeste, ocorrem pequenas depressões, onde são encontradas profundidades de até 9 m. O Canal do Jardim de Alah é a ligação da Lagoa com o mar, e atravessa o cordão litorâneo separando as praias de Ipanema e Leblon. É um canal artificial de cerca de 800 m de comprimento e larguras entre 10 e 18 m, cuja lâmina d'água, atualmente, é muito pequena. Atualmente, a Lagoa apresenta um espelho d'água de cerca de 2 Km², de dimensões aproximadas de 2 Km na direção Norte-Sul e 0,8 a 1,6 Km na direção Leste-Oeste, com volume em torno de 6.200.000 m³, e em seu interior tem-se a presença de duas ilhas: Piraquê, localizada na porção Noroeste, e Caiçaras, localizada na parte Sul, próximo ao Canal do Jardim de Alah.

Em 1880, segundo Barão de Teffé, a área espelho d'água da Lagoa era superior a 3.800.000 m². A partir de então, a Lagoa sofreu sucessivos aterros até que o espelho d'água foi tombado, em 1986, pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, com a atual dimensão. A perda do espelho d'água deveu-se mais aos aterros na margem do que ao assoreamento.

2.3. Bacias de Drenagem

As sub-bacias que drenam para a Lagoa são de suma importância por constituírem parte das encostas voltadas para o Sul. As sub-bacias contribuintes da Lagoa são as bacias dos rios Macacos, Cabeça e Rainha.

A pluviosidade média das bacias contribuintes está em torno de 1.600-1.800 mm anuais na porção inferior, aumentando para a faixa entre 1.800-2.000 mm/ano na porção média e ultrapassando 2.000 mm anuais na parte superior.

O Rio Cabeça nasce próximo ao Hotel das Paineiras, nos contrafortes do morro do Corcovado, aproximadamente na cota 425 m, e percorre uma distância de 2,7 Km até desaguar no canal da Av. Lineu de Paula Machado, que por sua vez, desemboca no Rio Macacos, no trecho da Avenida General Garzon. A área de drenagem desta bacia é de aproximadamente 1,9 Km².

Esta bacia apresenta grande extensão florestal contínua e pouco fragmentada, e drena as encostas compreendidas entre o Corcovado (ponto culminante com 710 m) e o Sumaré. Esta bacia é contígua a bacia do Rio Macacos, cujas condições são semelhantes, e que juntas, abrangem o trecho florestado de maior relevância do Maciço da Tijuca.

No trecho inferior da bacia do Rio Cabeça, a malha urbana alcança a cota de 50 m, no final da Rua Lopes Quintas, com florestas alteradas, em alguns trechos até a cota 250 m, devido ao histórico de ocupação da região.

Nesta bacia, são mais frequentes as encostas com declividades entre 20 e 30°, sendo que na parte superior as declividades são superiores a 35°. Na parte média inferior, as encostas apresentam declividades inferiores a 20°, principalmente próximo aos eixos de drenagem e da cota 40 m.

O rio Macacos é o principal contribuinte da Lagoa, e seu curso d'água principal percorre uma distância de 4,6 Km até desaguar na Lagoa, cujas nascentes são próximas à Mesa do Imperador, no alto dos morros dos Queimados e Sumaré, estando na cota 425 m, aproximadamente. No trecho mais urbanizado, o rio desce próximo à Rua Pacheco Leão, entrando depois no Jardim Botânico. Este rio drena os bairros do Jardim Botânico, Horto e Alto da Boa Vista, com área de drenagem em torno de 7,2 Km².

O ponto culminante desta bacia é o Pico da Carioca, com 784 m de altitude. Esta bacia possui o melhor trecho de floresta de todo o Maciço da Tijuca, em função de sua extensão, tipologias florestais e principalmente o estado de conservação das mesmas, constando em seu interior a Floresta do Pai Ricardo, onde se encontra formação primária de Mata Atlântica em

plena cidade do Rio de Janeiro. A bacia é drenada por numerosos tributários, a saber: Riacho Pai Ricardo, Córrego Xaxim, Rio do Ouriço, Riacho Sete Quedas e Riacho Andaime.

A bacia do rio Macacos é cortada longitudinalmente por uma linha de alta tensão, proveniente da Zona Norte da cidade, causando impactos devidos a abertura de trilhas de grande largura utilizadas para a conservação das torres de transmissão, provocando a erradicação da vegetação e a descaracterização da floresta vizinha.

Mais de metade das encostas têm declividade entre 20° e 35° ao longo de toda bacia. Cerca de 20% das encostas tem declividades maiores que 35° e concentram-se próximas aos eixos de drenagem, e as declividades menores que 10°, são menos que 10% e ocorrem principalmente ao longo do eixo do Rio dos Macacos, próximos à cota de 40 m.

O rio Rainha possui extensão de aproximadamente 4,9 Km e nasce na cota 450 m., sendo, portanto, o maior curso d'água da bacia hidrográfica, cuja área de drenagem é de aproximadamente 4,3 Km², possuindo apenas um pequeno afluente sem nome.

A principal característica desta bacia é estar muito fragmentada e com a cobertura florestal entremeada pela malha urbana, sendo a bacia que se encontra em pior estado de conservação devido ao aumento das favelas e a construção de condomínios de alto luxo.

Nesta bacia, 59% da área é formada por convexidades. As declividades entre 20 e 35% representam quase metade do total das encostas. Quase 20% de encostas com declividades superiores a 35° ocorrem próximo aos divisores, e as encostas com declividades inferiores a 20% ocorrem na porção média inferior desta bacia e próximo aos eixos de drenagem.

O sistema de drenagem da bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, desde a urbanização dos bairros nela inseridos tem-se demonstrado incapaz de escoar as águas das chuvas um pouco mais intensas, que ali ocorrem com freqüência. Tal situação vem se agravando com o adensamento urbano e a deterioração do sistema de drenagem existente, causando freqüentes enchentes que resultam em grandes prejuízos não só ao comércio e aos imóveis diretamente atingidos, bem como, pela interrupção da circulação viária durante os eventos.

Os bairros do Jardim Botânico e Gávea sofrem freqüentes enchentes causadas pelo extravasamento dos canais e precariedade da microdrenagem. Na Gávea, as enchentes ocorrem na Praça Santos Dumont e ruas adjacentes. No Jardim Botânico, as enchentes se avolumam no parque do mesmo nome, no prado do Jockey Club e em ruas próximas ao local conhecido como Ponte de Tábuas (esquina da rua Jardim Botânico com Pacheco Leão).

No âmbito da macrodrenagem os problemas devem-se à insuficiência de calha do rio Macacos, do canal da rua General Garzon, do canal do Jockey e da rua Visconde de Albuquerque, agravados pelas travessias existentes sobre esses leitos ocasionando perdas de

carga localizadas, em especial as obstruções causadas pela comporta do Piraquê (não operada) e a ponte da Av. Borges de Medeiros. Também merece menção, a captação de águas do rio Macacos, efetuada pelo Jockey e a barragem próxima e a jusante da rua Jardim Botânico, no braço daquele rio, que drena trecho desta rua e importante parcela do próprio Jardim Botânico.

A quantificação de parâmetros morfométricos é essencial não só para o conhecimento dos padrões de funcionamento dos ecossistemas aquáticos como também para fins práticos de manejo desses sistemas. O conhecimento dos parâmetros morfométricos e do tempo de residência da água permite avaliar a capacidade de suporte do ambiente com relação à entrada de efluentes e poluentes, às taxas de acumulação de substâncias tóxicas e aos padrões de dispersão de poluentes.

As inundações freqüentes devem-se principalmente à:

- Aumento dos volumes de água escoada e “vazões de pico” nas chuvas, devido às impermeabilizações do terreno ocorridas com o adensamento e expansão da área urbana;
- Insuficiência dos canais e galerias, uma vez que após a urbanização dos bairros, tiveram sua capacidade reduzida;
- Estrangulamento nas seções de escoamento em vários locais, devido à instalação inadequada de dutos e tubulações e ao assoreamento.

2.4. Ocupação Urbana

A ocupação do solo na cidade do Rio de Janeiro é classificada como área urbanizada, com uso predominantemente residencial de alta intensidade, e também comercial, de serviços, industrial, institucional, de lazer e área natural, onde ambas as categorias convivem, quase sempre, harmoniosamente, com gabarito predominantemente vertical, que se estende por toda a sua porção envoltória lagunar e bairros litorâneos. Nas zonas mais elevadas, predominam as matas e afloramentos rochosos.

A distribuição populacional está diretamente relacionada às características de cada região e a competição pelo uso do solo urbano. As disputas são pelas áreas residenciais e de produção e distribuição de bens e serviços. A partir do início do século XX, a introdução do bonde elétrico acelerou o crescimento do cinturão de bairros, e a abertura de túneis facilitou o crescimento ao longo da orla, desde a entrada da baía até as praias oceânicas, ocupando planícies costeiras, restingas e vales entalhados.

Dentro dos limites da Bacia Hidrográfica da Lagoa Rodrigo de Freitas, encontram-se inseridos 9 bairros, sendo que apenas 5 estão completamente incluídos, quais sejam: Gávea, Jardim Botânico, Lagoa, Ipanema e Leblon que compõem a VI Região Administrativa (RA) do município. Os demais bairros são Santa Teresa (XXII RA), Humaitá (IV RA), Rocinha (XXVIII RA) e Alto da Boa Vista (VIII RA).

As áreas mais degradadas encontram-se na porção leste da Lagoa, onde ocorreram historicamente, maiores desmatamentos, inicialmente por atividades agrícolas, apresentando avançado estágio de comprometimento. O processo de expansão urbana junto aos pés do Morro da Saudade e próximo ao Parque da Catacumba, foi decisivo, embora tenha imprimido alto padrão de habitabilidade junto ao eixo viário da Av. Epiplácio Pessoa.

A área da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas apresenta diferentes atividades associadas ao setor primário, representado pela prática da pesca comercial na Lagoa, ao setor terciário, onde a presença de importantes centros de bairro atraem pontos comerciais, shoppings, centros empresariais, e ao setor quaternário, que tem na atividade turístico-hoteleira seu ponto de destaque. Entre as atividades potencialmente poluidoras, em função dos despejos e dejetos que ocorrem, destacam-se lavanderias, postos de gasolina, restaurantes, etc.

De forma espacializada, a ocupação urbana é mais concentrada nas áreas mais planas e contíguas aos principais eixos de penetração viária, acabando por configurar dois grandes bolsões de ocupação – ao norte da Lagoa, com população distribuída entre os bairros da Lagoa e Jardim Botânico, e ao sul, entre a Lagoa e as Praias Oceânicas (Ipanema e Leblon). Ressaltam na paisagem concentrações demográficas com ocupações subnormais, como a favela da Rocinha e a comunidade Vila Parque da Cidade, com densidades que variam de 1.000 a 1.500 hab/ha. Embora não seja caracterizada como favela, a Cruzada São Sebastião destaca-se pela alta densidade demográfica, registrando mais de 1.500 hab/ha. Até 1991, residiam na Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, cerca de 4.775 habitantes em ocupações subnormais, representando 10,3% da população total residente nas comunidades do Morro do Cantagalo, Vila Parque da Cidade e Rocinha. Dados do IBGE, referentes aos censos de 1996 e 2000, mostram que a Região Administrativa da Lagoa, em termos populacionais, manteve-se estável, seguindo a tendência histórica de redução da população residente, embora tenha sofrido alterações internas, onde se constata que o Vidigal cresceu 23,7%.

Estima-se, que circulem nas áreas adjacentes à Lagoa Rodrigo de Freitas, das 6:00 horas à meia-noite de um domingo de sol, cerca de 50.000 pessoas. Num sábado à noite, os quiosques podem receber de 3.000 a 8.000 visitantes, sendo que o valor estimado de usuários da Lagoa é da ordem de 25.000 pessoas/dia.

2.5. Inter-relação dos Sistemas de Saneamento da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas

Lagoas costeiras são ecossistemas aquáticos de grande importância, uma vez que constituem interface entre zonas costeiras, águas interiores e águas costeiras marinhas, sendo, portanto, ecossistemas de transição. São ecossistemas com estrutura e dinâmica próprias que respondem às agressões humanas. Segundo Odum (1972), em lagunas, os fitoplânctons e as macrófitas aquáticas são responsáveis por uma alta produtividade e uma cadeia alimentar primária e complexa, resultando em grande número de crustáceos, moluscos e peixes, que utilizam este habitat para alimentação, reprodução e crescimento. Suprimir um ecossistema lagunar significa eliminar inúmeros nichos ecológicos, empobrecer a biodiversidade, produzir alterações no microclima e perturbar as permutas entre águas superficiais e subterrâneas, pelo menos. Efetuar intervenções antrópicas numa lagoa sem detalhado conhecimento prévio pode gerar desestratificação térmica, reduzir a rica zona litorânea e perturbar todo o equilíbrio ecológico.

O tamanho e a forma de um sistema aquático influenciam muitas de suas características físicas, químicas e biológicas. A morfometria de um corpo d'água afeta os processos hidrodinâmicos, o tempo de residência da água, os processos de erosão, transporte e acumulação de sedimentos, o balanço de massa de nutrientes, a estabilidade térmica da coluna d'água, a produtividade biológica e os processos de circulação e dispersão de organismos e nutrientes.

As lagoas costeiras brasileiras têm, desde os tempos dos colonizadores e em especial nas últimas décadas, recebido os mais diferentes tipos de impactos antrópicos, sendo os ecossistemas mais impactados do país, resultando em alterações consideráveis nas suas características naturais. Em algumas lagoas costeiras brasileiras o nível de degradação alcançado já compromete por completo, qualquer possibilidade de uso múltiplo destes ecossistemas.

Quase cinco séculos de aterros sucessivos, obras de dragagem, desflorestamento e erosão acelerada, modificaram substancialmente a rede de drenagem e a paisagem do Rio de Janeiro. O processo predatório da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, resultante da especulação imobiliária e da poluição provocada pelos esgotos clandestinos devido à expansão desordenada da cidade em direção a zona sul, realizado na primeira metade do séc. XX, deu origem aos atuais problemas ambientais da área.

Segundo dados do IBGE (1991), considerando os setores censitários, as áreas densamente ocupadas na Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, em sua grande maioria, têm

acesso à rede de abastecimento de água. As demais áreas, cuja ocupação se apresenta de maneira informal, registram apenas cerca de 30 a 50% de domicílios assistidos por este serviço público, coexistindo formas de captação individualizadas. Segundo as informações censitárias de 1991, 90 a 100% dos domicílios são assistidos por serviço de coleta de lixo, com destinação final do lixo coletado (inclusive hospitalar e industrial) em aterro sanitário.

A área da Bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas, praticamente na sua totalidade, está coberta por redes coletoras de esgoto, em funcionamento. As áreas que não apresentam cadastro oficial de rede coletora de esgotos são áreas não passíveis de ocupação, segundo a legislação de uso do solo. Além do esgoto sanitário de origem doméstica, a rede coletora recebe contribuições de origem não doméstica, podendo ser industriais ou geradas por diversas atividades econômicas, recreativas ou institucionais, gerando uma grande diversidade no efluente.

A lagoa é circundada por área densamente urbanizada. Embora dotadas de rede de esgotamento sanitário, as bacias que contribuem naturalmente para ela acabam por fazer chegar a suas águas alguma carga poluidora. E a ação continuada dessa poluição resulta em danos à qualidade das águas da Lagoa.

A região é esgotada pelo sistema separador absoluto, que utiliza redes independentes para esgotos sanitários e águas pluviais. A rede de águas pluviais contribui para os diversos corpos d'água da bacia, incluindo os rios Macacos, Cabeças e Rainha, os canais do Jardim de Alah e Visconde de Albuquerque e a própria Lagoa.

Os lançamentos de águas pluviais à Lagoa e aos corpos d'água que a ela contribuem deveriam, em princípio, carrear para as suas águas apenas a carga poluidora correspondente à lavagem de pisos pela água de chuva, carga ponderável, mas passível de ser absorvida e processada pela capacidade natural de autodepuração da Lagoa. A maior parte do sistema de esgotamento sanitário da região foi implementada na primeira metade deste século - alguns trechos datam do final do século passado, constituídos por galerias construídas em 1894 - e sobrecarregadas com a vazão atual. Não previram - e naquela época não se poderia de fato prever - o enorme adensamento populacional da região. A explosão imobiliária de alguns trechos, particularmente o chamado alto Leblon, deu-se nas últimas três décadas.

A contaminação dos rios, canais e galerias de águas pluviais indicam que ainda há uma deficiência da oferta de serviços de saneamento em relação às necessidades do ecossistema uma vez que a Lagoa Rodrigo de Freitas já sofria alguns desequilíbrios de anoxia de suas águas na primeira metade do século XX, devido ao processo natural de envelhecimento e a partir de 1950 este processo se intensificou e acelerou com a ocupação da orla lagunar.

Portanto, a Lagoa Rodrigo de Freitas constitui-se em um bioindicador, “refletindo” a condição ambiental do ecossistema através da qualidade de suas águas, quando é submetida a impactos de importância muito acima da sua capacidade de assimilação.

3. ASPECTOS DA QUALIDADE DA ÁGUA NA LAGOA RODRIGO DE FREITAS

3.1. Introdução

“Entende-se por poluição da água alteração de suas características por quaisquer ações ou interferências, sejam elas naturais ou provocadas pelo homem. Essas alterações podem produzir impactos estéticos, fisiológicos ou ecológicos. O conceito de poluição da água tem-se tornado cada vez mais amplo em função de maiores exigências com relação à conservação e ao seu uso racional dos recursos hídricos.” (Braga et al, 2002)

Segundo a Resolução CONAMA nº 20/86, o enquadramento da Lagoa Rodrigo de Freitas, para águas salobras, é na Classe 7 - recreação de contato primário, proteção das comunidades aquáticas, criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana. A Lagoa Rodrigo de Freitas está classificada, segundo seus usos benéficos, com enquadramento *“para recreação de contato secundário: estético; preservação da fauna e flora naturais e de espécies destinadas à alimentação humana.”* (FEEMA, 1979)

Os esgotos, as águas pluviais contaminadas e os aterros são elementos que fragilizam a capacidade de suporte e intensificam os processos de metabolismo da Lagoa, podendo redundar no colapso temporário do sistema, a partir da extinção do oxigênio na coluna d’água.

Os principais fatos geradores de impactos ambientais na Lagoa Rodrigo de Freitas, que implicam diretamente na qualidade de suas águas, segundo Zee (2002), são:

Antrópicos:

- Aporte de esgotos domésticos e de serviços;
- Aporte de águas pluviais contaminadas;
- Aporte de resíduos sólidos/lixo;
- Aporte de óleos e graxas;
- Aterros.

Naturais:

- Fortes ventos (frente fria);
- Chuvas torrenciais;
- Nível de insolação;
- Obstrução do Canal do Jardim de Alah.

3.2. Caracterização da qualidade da água na área de interesse

O estudo do metabolismo do ecossistema lagunar é fundamental para a compreensão dos impactos causados neste meio por fatores naturais ou antrópicos.

Neste tópico serão abordadas algumas variáveis que influenciam diretamente a qualidade das águas da Lagoa Rodrigo de Freitas e a influência destas sobre o ecossistema em questão principalmente no que diz respeito a formação e ressuspensão de lodo.

De forma simplificada, os organismos capazes de sintetizar matéria orgânica a partir de gás carbônico, sais minerais e energia solar são responsáveis pela etapa do metabolismo lacustre denominada produção. Os principais produtores primários são algas, macrófitas aquáticas e algumas espécies de bactérias. Parte da produção é gasta para a manutenção do próprio metabolismo desses organismos e parte é transformada em biomassa que constitui a fonte de energia para as demais cadeias alimentares de todo o ecossistema. Na etapa de consumo, os organismos obtêm sua energia direta ou indiretamente a partir da matéria orgânica sintetizada pelos produtores primários. São consumidores primários os herbívoros que podem ser de várias espécies de zooplâncton, peixes e insetos aquáticos. A partir dos consumidores secundários ou carnívoros, não há consumo direto da produção primária para obtenção de energia. Portanto, a transferência de energia através dos níveis tróficos é de acordo com a cadeia alimentar. Algas, bactérias e fungos são os principais responsáveis pela etapa de decomposição, onde a matéria orgânica é decomposta até sais minerais, H₂O e CO₂. É através da atividade destes organismos que é possível a circulação de nutrientes possibilitando que estes sejam reaproveitados pelos organismos produtores. As etapas do metabolismo do sistema lacustre ocorrem de maneira integrada com alto grau de interdependência. No caso da Lagoa Rodrigo de Freitas, observa-se o predomínio dos processos de produção em relação aos processos de consumo e decomposição, o que é comum em lagos eutróficos que apresentam altos índices de nutrientes, pouca penetração de luz, baixa concentração de OD, alta taxa de crescimento de algas e biodiversidade baixa (Esteves, 1998).

Poluentes em um ecossistema lacustre provocam maiores ou menores impactos de acordo com a sua natureza e com os usos diversos da água. Poluentes orgânicos biodegradáveis, compostos em sua maioria por proteínas, carboidratos e gorduras, são degradados por organismos decompositores. Se houver presença de oxigênio dissolvido no meio, a decomposição é feita por bactérias aeróbias e neste caso, se o consumo for maior que a capacidade do meio em repô-lo e houver esgotamento de oxigênio, poderá ocorrer a destruição da fauna ictiológica e outras espécies aeróbias. Sem a presença de oxigênio

dissolvido, a decomposição é anaeróbia e ocorre a formação de gases como o metano e o gás sulfídrico.

A partir da análise dos fatos geradores de impactos ambientais anteriormente apresentados, podem ser identificados os principais indicadores de degradação do ecossistema lagunar, a saber:

- Assoreamento;
- Anoxia da coluna d'água;
- Aumento da turbidez, alteração da cor d'água;
- Mau cheiro, odor;
- Crescimento excessivo de macrófitas e algas;
- Presença de resíduos sólidos sobrenadantes.

Para analisar o comportamento ambiental dos ecossistemas lagunares se faz necessária a observação de processos que caracterizam esse comportamento: a estratificação térmica, a eutrofização e ressuspensão de sedimentos.

A estratificação térmica é o fenômeno em que se observa uma clara distinção entre as temperaturas das camadas superficiais e profundas e a conseqüente variação de densidades entre essas camadas gerando uma estabilidade que só será rompida por forças externas, que atuando sobre a massa líquida, conseguem fornecer energia suficiente para provocar a mistura. A temperatura é influência decisiva sobre a densidade e viscosidade da água e ainda sobre os movimentos de convecção, sem contar com as conseqüências biológicas na distribuição, periodicidade e reprodução dos organismos, cujo comportamento é esperado por se tratar de uma laguna costeira rasa onde a resposta à insolação é praticamente imediata.

Ainda com relação à disponibilidade de energia luminosa, a avaliação da turbidez e transparência da água determina o grau das atividades fotossintéticas dos organismos e as suas limitações e conseqüentemente, a produção primária do ecossistema. A lagoa Rodrigo de Freitas apresenta reduzido grau de transparência. Elevadas biomassas de algas planctônicas podem reduzir a transparência bem como a ressuspensão de sedimentos já que a Lagoa apresenta pouca profundidade. A turbidez é influenciada pela quantidade de matéria orgânica e inorgânica em suspensão na coluna d'água o que permite observar que no inverno, quando é mais freqüente a entrada de frentes frias e a ocorrência de ventos fortes, a turbidez apresenta valores superiores aos do verão.

A estratificação térmica tem grande influência nos processos químicos e biológicos que acontecem em lagos uma vez que a estabilidade induzida por esta estratificação inibe os

processos de transporte de calor e massa no reservatório, causando assim problemas relativos à qualidade da água.

A eutrofização é um processo natural de maturação de um ecossistema lacustre em que ocorre um enriquecimento das águas com nutrientes que são necessários ao crescimento da vida vegetal aquática, ou seja, é um processo de sucessão ecológica dos ecossistemas. É um processo bastante demorado, associado ao tempo de evolução dos ecossistemas, porém é acelerado pela intervenção humana quando há ocupação de atividades industriais, agrícolas ou zonas urbanas. A eutrofização é manifestada por meio do aumento da produtividade biológica dos lagos, acarretando proliferação de algas e outros vegetais aquáticos devido à maior quantidade de nutrientes disponível, provocando desequilíbrio ecológico. Dentre estes nutrientes, os mais importantes para a ocorrência deste processo são em geral o fósforo e/ou o nitrogênio. Esgotos domésticos e industriais são ricos em fósforo e quando lançados sem tratamento em lagos provocam a eutrofização acelerada. Lagos eutróficos que possuem produção vegetal excessiva e alta concentração de nutrientes, geralmente são de águas rasas e apresentam pouca penetração de luz, baixa concentração de oxigênio dissolvido e biodiversidade baixa. Alguns dos impactos da eutrofização sobre o ecossistema e a qualidade da água são, segundo Braga *et al* (2002), a diminuição da diversidade biológica pois poucas espécies sobrevivem às condições adversas, a alteração das espécies de algas presentes no meio, os baixos teores de oxigênio dissolvido, as concentrações elevadas de compostos orgânicos dissolvidos, diminuição da transparência da água e a decomposição anaeróbica que ocorre no fundo do lago liberando metano, gás sulfídrico amônia, além de fósforo, ferro e manganês e outros compostos, alterando condições químicas como pH, por exemplo.

Sob a ação de fortes ventos, a superfície de um corpo d'água é movimentada pela formação de ondas que são capazes de deslocar toda a coluna d'água. Dependendo da intensidade do vento e da profundidade do corpo d'água, o movimento das ondas pode atingir o fundo e gerar forças de atrito capazes de movimentar os sedimentos aí presentes, promovendo a ressuspensão dos mesmos. A ressuspensão de sedimentos é indutora direta da redução dos níveis de oxigênio dissolvido na coluna d'água.

As ondas geradas pelo vento revolvem o fundo da lagoa, colocando em suspensão o lodo orgânico. Quando o lodo é revolvido há liberação de gás sulfídrico para a coluna d'água. Este gás combina-se com o oxigênio, absorvendo praticamente todo oxigênio disponível, reduzindo-o para níveis inferiores a 2 mg/L O₂ ou, mesmo, provocando a sua completa extinção. Desta forma, os organismos superiores, como os peixes, morrem em questão de horas, pois necessitam, para sobreviverem, do oxigênio disponível na coluna d'água. Os

sedimentos ressuspensos, ao fertilizarem a água, favorecerem o crescimento excessivo de macrófitas e microalgas, ocasionando também a falta de oxigênio para os peixes, pois na ocorrência de morte das algas, o processo de sua decomposição (aeróbico), consome o oxigênio disponível. As algas mortas decantam e incorporam-se ao lodo. A mortandade de peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas provocada pela ressuspensão de sedimentos para a coluna d'água é o impacto mais incômodo para a população que frequenta a região.

A desestabilização dos processos de estratificação térmica, eutrofização e deposição de sedimentos no fundo, ocorre quando o corpo d'água está sujeito a fatores externos. O principal fator é a força provocada pelo vento sobre a superfície da água que gera ondas e provoca a movimentação da massa de água. Para os processos de estratificação térmica e eutrofização, para que a estabilidade seja rompida, basta que as forças atuem na coluna d'água. No caso da desestabilização da camada de sedimentos, as forças têm que ser fortes o suficiente para, além de movimentarem a coluna d'água, atingirem o fundo com intensidade capaz de romper as forças de atração entre as partículas do sedimento, que dependem sobretudo da sua composição.

4. DINÂMICA DE SEDIMENTOS EM LAGOAS

4.1. Introdução

O sedimento é um dos componentes mais importantes dos ecossistemas aquáticos continentais com relação à ciclagem de matéria e fluxo de energia podendo ser considerado como o resultado da integração de todos os processos que ocorrem nesses ecossistemas (Allen & Collinson, 1986). Nele ocorrem processos químicos, físicos e/ou biológicos, que influenciam o metabolismo de todo o sistema e através de sua composição química e biológica pode-se determinar a evolução histórica dos ecossistemas aquáticos e terrestres adjacentes e avaliar a intensidade e as formas de impactos a que estiveram ou estão submetidos os ecossistemas em questão.

O sedimento lacustre pode ser classificado em dois tipos: orgânico e mineral. A designação dada ao lodo presente no fundo de lagoas estagnadas é sapropel ou lodo ativo, que é uma lama pútrida formada em condições anaeróbias, rica em plâncton. Esse lodo é composto de restos orgânicos putrefatos, sobretudo de vegetais unicelulares do plâncton (algas azuis, verdes, etc.) e ele comporta uma proporção variável de silte terrígeno. Como é grande a presença de matéria orgânica no fundo da Lagoa, ocorre grande absorção de oxigênio dissolvido, onde bactérias anaeróbias podem sobreviver, sendo impossível encontrar vida animal. Essas bactérias retiram o oxigênio de compostos presentes na água e liberam hidrogênio que imediatamente se une a outros elementos como enxofre, derivados dos sulfatos, formando H_2S , que é muito solúvel em água e torna o fundo mais inóspito para todas as formas de vida, e que quando atinge a camada mais superficial das águas contribui para a mortandade de peixes. Além disso, o H_2S ataca compostos solúveis de ferro, formando sulfetos de ferro, que se precipitam sob a forma de uma lama preta.

Através da análise dos componentes presentes nos perfis de sedimento, como matéria orgânica, íons metálicos, entre outros, é possível identificar as alterações sofridas pelo ecossistema lacustre. Na maioria desses ecossistemas distinguem-se duas camadas: a recente ou biológica e a permanente. A concentração de matéria orgânica é maior na camada recente e está em contato direto com a coluna d'água. É a parte do sedimento biologicamente mais ativa por apresentar condições ambientais mais favoráveis para o desenvolvimento de microorganismos e organismos bentônicos devido à alta concentração de compostos ricos em lipídios, proteína e carboidratos. A camada permanente ou sedimento permanente está localizada abaixo da camada recente com baixo teor de matéria orgânica apresentando textura

mais rígida e reduzida atividade biológica e sob o ponto de vista químico tem intensa atividade, principalmente quanto a solubilidade de íons. Tanto a camada recente quanto a camada permanente são compostas por duas frações distintas, sendo a primeira formada pela matéria particulada, e a segunda pela água intersticial (água do sedimento). A fração particulada do sedimento é a principal fonte de energia para microorganismos e organismos bentônicos. Em ambientes em que há alta produção primária, a fração particulada é principalmente composta por matéria orgânica, ao contrário dos lagos com baixa taxa de produção primária, laguna costeiras e represas, onde a matéria particulada é predominantemente inorgânica, como por exemplo, argila.

A matéria orgânica de difícil decomposição é formada principalmente por compostos lignificados, e é acumulada, contribuindo para a formação do sedimento permanente, não mais tomando parte do metabolismo direto do lago. (Esteves, 1998)

O sedimento constitui um compartimento importante na avaliação da intensidade e formas de impactos a que os ecossistemas aquáticos estão ou estiveram submetidos, uma vez que realizam constantes trocas de nutrientes e outras substâncias poluentes ou não com a coluna d'água. Considerando o sedimento como compartimento que reflete os processos que ocorrem no ecossistema aquático, a sua composição indica o seu estado trófico e reflete o nível de produção do sistema. A alta concentração de matéria orgânica presente no sedimento de lagos eutróficos faz com que estes apresentem coloração escura, que é uma de suas principais características.

A transferência de calor pela interface ar-água, a mistura advectiva gerada pela movimentação das vazões de entrada e saída e a mistura provocada pela turbulência induzida pelo vento são os principais fatores que interferem nos processos de mistura da coluna d'água em lagos.

A interação entre a água de um lago e os sedimentos do fundo ocorre mais ativamente nas zonas mais rasas das margens lacustres ou zona litorânea. Uma grande parte do material em suspensão levado para um lago pelo fluxo da água precipita-se no fundo da zona litorânea e vários tipos de substâncias solúveis são liberadas dos sedimentos para a água. Adicionalmente, a ação do vento e das ondas causa agitação e ressuspensão de partículas finas, tanto orgânicas como inorgânicas, na camada superficial dos sedimentos do fundo.

4.2. Processo de formação de sedimentos, deposição e ressuspensão

Os lagos são corpos aquosos de variadas dimensões cuja origem está relacionada, ao vulcanismo, tectonismo, às glaciações e à acumulação sedimentar. Uma das mais destacadas

características dos lagos é que este ambiente tende a desaparecer através de um processo contínuo de dessecação levando a uma diminuição do espelho d'água e a progradação das margens em direção à região central do lago. Atualmente, os lagos cobrem menos de 1% da superfície continental da Terra e contém menos que 0,02% da hidrosfera. Apesar disso, sua significância geológica é bem maior do que pode sugerir a sua distribuição. Os lagos podem ser considerados como laboratórios naturais por possibilitarem um refinamento do conhecimento já adquirido a respeito dos processos físicos, químicos e biológicos relevantes não só para o ambiente lacustrino como também para vários outros ambientes. Muito do que se conhece hoje sobre deltas, processos litorais, correntes de turbidez, sedimentação em ambientes profundos e eventos anóxicos oceânicos foi derivado de estudos realizados em lagos (Allen & Collinson, 1986). No ambiente lacustre ocorre um expressivo acúmulo sedimentar ao longo de um longo período de tempo e, por este motivo, são bons indicadores das variações climáticas experimentada por uma determinada região. Os sedimentos que se acumulam no fundo de um lago são principalmente clásticos e consistem em areia fina, silte e argila podendo ocorrer também a deposição de sedimentos químicos, tais como evaporitos e calcários. Esta fácies, juntamente com a acumulação de folhelhos ricos em óleo e gás confere a este ambiente uma importância econômica.

As lagunas são invadidas periodicamente pelas águas do mar e alimentadas continuamente por águas fluviais. A importância alternada da intervenção marinha e da intervenção fluvial proporciona a formação de séries sedimentares rítmicas. A fração argilosa dos sedimentos reflete a variação da composição do meio, sendo mais ou menos detrítica e mais ou menos química. O mineral argiloso detrítico dominante é a illite, mas podem ocorrer outros, tais como: clorite, montmorilonite, illite e interestratificados. Nas lagunas situadas em meios geográficos, a que correspondam climas mais quentes, a evaporação é favorecida, permitindo a precipitação de sais, constituindo em casos particulares depósitos salinos denominados evaporitos. Nestas condições, na composição da fração argilosa poderão participar minerais de neoformação e transformação, tais como: talco, corrensite, palygorskite, sepiolite, etc.

As propriedades químicas da água dos lagos contêm uma quantidade de íons tal que pode classificar o ambiente como salino ou dulceaquícola. Os principais íons dissolvidos nas águas dos lagos são: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{++} , K^{+} , CO_3^{-} , SO_4^{-} Cl^{-} e a precipitação e cristalização destes sais origina as fácies evaporíticas ou por outro lado, predominando os siliciclásticos, se formarão as fácies arenosas, sílticas e argilosas.

A temperatura da água dos lagos também condiciona os diferentes tipos sedimentares. Em lagos glaciais que permanecem congelados durante todo ano apresenta fácies sedimentares diferentes de lagos tropicais que permanecem aquecidos durante longos períodos. A densidade, que é controlada também pela temperatura, gera gradientes na coluna d'água originando movimentos do fluido chamado de correntes de advecção. Estas correntes forçam o movimento das águas frias superficiais para o fundo e movimentam as águas do fundo em direção à superfície carregando oxigênio e garantindo a oxidação dos sedimentos mais profundos do lago. A drenagem fluvial contribui com sedimentos clásticos para o interior da bacia os quais se depositam quando ocorre uma diminuição da energia ambiental no encontro das águas do rio com as águas mais calmas do lago. Formam-se acumulações de sedimentos grosseiros que constroem deltas que crescem em direção ao centro do lago, propagando-se sobre os sedimentos mais finos. Na praia lacustre estão presentes estruturas sedimentares originadas das variações do nível do lago causado pelas marés, bem como sedimentos mais grosseiros retrabalhados pelas ondas. Como feições de praia podem ser encontrados esporões arenosos, dunas, bermas e concentrações de minerais pesados. O sedimento pode apresentar biodetrítos originados da fauna composta de ostracodes, gastrópodos, bivalvos e da flora constituída de diatomáceas, cianofíceas e algas carófitas. O clima determina os tipos sedimentares do ambiente lacustre que podem ser evaporíticos, ou salinos, e siliciclásticos. Nos lagos de climas tropicais não se observa a formação de correntes de advecção pela diferença de densidade das águas no inverno e verão. Nesta situação as águas profundas tornam-se estagnadas criando ambientes anóxicos, com altos teores de matéria orgânica, como mencionado anteriormente.

Em um sistema lacustre siliciclástico ocorre a predominância das fácies arenosas, sílticas e argilosas e a formação de arenitos finos e folhelhos com laminações caracteristicamente finas, plano-paralelas e cíclicas facilmente reconhecidas nos afloramentos. A sedimentação ocorre distribuída em dois sub-ambientes deposicionais: deposição marginal ou litoral e deposição central. A deposição marginal é caracterizada pelas fácies mais grosseiras encontradas num ambiente lacustre. A ação dos processos físicos origina a formação de estruturas sedimentares tais como marcas de onda (*ripple marks*) e, em presença de deltas, a porção marginal sub-aérea pode apresentar estratificação plano-paralela horizontal (*top sets*). Na região de maior gradiente, a estratificação é plano-paralela inclinada para o interior do lago evidenciando a progradação sedimentar (*fore sets*) tornando a serem horizontais no fundo do lago (*botton sets*). Os sedimentos típicos da fácies central tem granulometria fina, pelágica podendo ocorrer turbidítos resultantes dos fluxos de gravidade

para o interior da bacia. A região central (Fácies Central) pode apresentar estratificação sazonal gerado por condições diferenciadas de sedimentação do verão em relação ao inverno, como é caso dos lagos em regiões temperadas.

Os lagos salinos ou evaporíticos ocorrem em climas áridos e semi-áridos. A evaporação da água que acontece devido às altas temperaturas favorece a formação dos sedimentos autóctones através da concentração de íons levando, inicialmente, a deposição de carbonatos com a formação de calcita e aragonita. Outros organismos contribuem com carbonato biodetrítico para o sedimento podendo-se citar os estromatólitos e esteiras algáticas. Estas bioconstruções podem se formar tanto nas regiões marginais, de maior energia quanto no fundo do lago a partir da atuação de correntes de turbidez. A fácies central será, então, composta por margas e calcilutitos. A concentração salina acumula-se gradativamente até um limite de tolerância dos organismos que é de 5.000 ppm. Após os carbonatos ocorre a deposição dos sulfatos (CaSO_4) e em seguida a Gipsita, a Anidrita e a Halita (NaCl). A partir daí precipitam os sais solúveis de acordo com as sua solubilidade, a Silvita (KCl), Carnalita ($\text{MgCl} \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e a Taquidrita ($2\text{MgCl}_2 \cdot \text{CaCl}_2$). A partir da deposição da Halita, o lago é considerado hipersalino obrigando a adaptação das espécies ou até mesmo à colonização por outras espécies mais adaptadas ao ambiente estressante. Os lagos salinos podem apresentar formações denominadas *teepe* que se caracterizam como sais cristalizados a partir da água intersticial presente nos espaços gerados pelas gretas de contração (*mud cracks*). Algumas porções dos lagos hipersalinos podem exibir uma coloração avermelhada como é devido à presença de algas cianofíceas, bactérias e à precipitação da carnalita.

O conhecimento da sedimentologia é importante no estudo de problemas ambientais, onde, abrangendo sedimentos recentes e processos sedimentares, se faz necessária uma investigação detalhada do regime de ventos, ondas e marés e das propriedades físicas dos sedimentos. O equilíbrio sedimentar no ambiente lacustre é influenciado pelas condições meteorológicas, energia de ondas, características granulométricas e ações antrópicas. Estes fatores influenciam no transporte e produção de sedimentos. Os principais agentes que atuam para o efetivo transporte são a água, o vento e a gravidade. É possível classificar o agente de transporte quanto à sua competência (tamanho de grão que pode transportar), quanto à sua capacidade (qual a quantidade de sedimentos que o agente pode transportar) e quanto à sua carga (quantidade de sedimentos que o agente transporta). A ação provocada na água pelo vento com a gravidade, constitui o principal agente de transporte de sedimentos.

Várias são as análises que podem ser feitas, cada uma com um propósito específico de pesquisa para determinação das características dos sedimentos: determinação do tamanho e

forma dos grãos, composição mineralógica detrítica, teor de matéria orgânica, concentração do material em suspensão e teor de carbonatos. O estudo do tamanho de grão nos sedimentos é importante para o entendimento dos mecanismos operantes (processos físicos) durante o transporte e deposição, bem como definição da distância que o sedimento percorreu durante o transporte. A maior parte dos sedimentos são heterogêneos granulometricamente, apresentando partículas de diferentes tamanhos (seixos, grânulos, areias, siltes, argilas). A presença de materiais de tamanhos diversos faz necessário que a análise da composição do sedimento seja desenvolvida mediante a aplicação de métodos combinados, dependendo das reações das partículas e do tamanho das mesmas. Desta maneira, os sedimentos grosseiros são peneirados, enquanto, as partículas mais finas são analisadas por diversos processos, baseados principalmente na Lei de Stokes (1851). Esta lei estabelece que a velocidade de decantação de uma partícula está relacionada com seu raio, com a diferença entre a densidade da partícula e a densidade do fluido e com a viscosidade do fluido. Nesta simplicidade, uma partícula maior irá sedimentar mais rápido que uma menor, de igual densidade. Por outro lado, comparando duas partículas de igual diâmetro e diferentes densidades, a densa irá depositar primeiro. As partículas finas sedimentam com velocidade constante na água ou em outros fluidos. A velocidade constante é alcançada quando a resistência do fluido se iguala à força de gravidade que age sobre a partícula. A velocidade de sedimentação depende do raio, forma, densidade e da textura superficial (lisa, fosca) da partícula e da viscosidade e densidade do fluido. A velocidade de sedimentação de partículas grandes não pode ser controlada pela variação da viscosidade do meio fluido. Partículas pequenas sedimentam sob condições de resistência viscosa, enquanto partículas maiores sedimentam sob condições de inércia.

Na natureza, a velocidade de decantação das partículas irá variar, também, em função da forma e com a concentração dos grãos. Com a concentração, visto que a taxa de sedimentação também é afetada pela colisão das partículas e com a forma, devido à maior ou menor hidrodinâmica do grão - quartzos e feldspatos tendem ser mais ovóides; micas são pacóides e biodetritos são altamente irregulares. Desta maneira, a idéia de equivalência hidráulica de sedimentação de partículas tem que se desenvolver, levando-se em consideração a forma das mesmas. Partículas de equivalência hidráulica sedimentam com a mesma velocidade na água.

As substâncias existentes em meios aquáticos encontram-se distribuídas em duas fases: sólida e líquida. A fase sólida depende das associações com a matéria particulada em suspensão, em particular com os sedimentos coesivos. Esta partição é um fator regulador do transporte destas substâncias, uma vez que a fase sólida é condicionada pela sedimentação, que a remove da coluna de água, estando por isso mais propensa a afetar habitats bênticos,

enquanto a fase líquida, dissolvida na coluna de água, está mais relacionada com os processos aí ocorrentes. A distribuição entre a fase particulada e dissolvida é um dos mais importantes mecanismos no controle de transporte de sedimentos, podendo um elevado número de fatores influenciar esta distribuição, nomeadamente a salinidade, o pH e o equilíbrio oxidação-redução. A circulação de sedimentos num ecossistema lagunar é, por conseguinte, um processo cíclico.

Os sedimentos coesivos são constituídos por frações de minerais inorgânicos, materiais orgânicos e bioquímicos. Os minerais consistem em vários tipos de argilas (em maior percentagem), nomeadamente ilite, montmorilonite e kaolinite, e outros não argilosos (quartzo e carbonatos). Os materiais orgânicos incluem detritos animais e vegetais e bactérias. Em termos granulométricos, consideram-se sedimentos com propriedades coesivas aqueles cujos diâmetros característicos são inferiores a 63 μm . A coesão aumenta à medida que a dimensão da partícula diminui e que esta cessa para diâmetros superiores a 40 μm . As superfícies destes sólidos tendem a ter um excesso de energia superficial devido à sua elevada razão de área por unidade de volume e ao desequilíbrio das forças químicas entre os átomos, íons e moléculas superficiais. O nível de energia superficial pode ser diminuído por uma redução da área superficial através da agregação de partículas, ou pela adsorção de espécies em solução.

A agregação de partículas em suspensão em flocos é essencial para a sedimentação, pois flocos maiores favorecem a sedimentação, sendo a probabilidade de se agregarem dependente da probabilidade de colisão entre elas e da eficiência da colisão. A colisão de partículas depende essencialmente da concentração da suspensão, das condições de turbulência, da aproximação entre elas por movimentos Brownianos e devido a terem velocidades de sedimentação diferenciadas. A eficiência depende das características das partículas (teor orgânico, origem biológica) e das condições do meio envolvente, onde a salinidade toma um papel relevante. A maior parte das pequenas partículas presentes em águas naturais, apresentam uma carga de superfície negativa. Esta carga negativa é contrabalançada por uma nuvem de íons positivos à sua volta, criando-se uma dupla camada elétrica. Quando duas partículas se aproximam, a repulsão eletrostática evita o seu choque. A salinidade provoca a diminuição da espessura da dupla camada elétrica, devido ao menor gradiente entre a concentração de íons positivos em torno da partícula e concentração de íons na água. Assim as partículas aproximam-se o suficiente passando as forças de Van Der Waals a serem mais fortes que a repulsão eletrostática, ocorrendo a coagulação e a floculação. Os agregados de sedimentos apresentam características diferentes em relação às partículas individuais. A sua dimensão pode chegar a ser várias ordens de grandeza superior, na ordem dos milímetros; são

bastante frágeis e com tendência para quebrarem; a sua massa específica é inferior devido a existência de água intersticial na sua constituição e a sua forma é mais esférica relativamente à forma laminar da partícula singular, o que provoca uma diminuição da resistência.

A velocidade de queda de uma partícula no interior de um fluido depende das forças gravitacionais - que por sua vez dependem da densidade de cada partícula individual ou do volume de água intersticial existente nos flocos formados por estas - e do atrito provocado pelo movimento de deposição - que depende da forma do floco e do número de Reynolds do escoamento em torno do floco durante a deposição.

A concentração de sedimentos, como referido, é um importante mecanismo controlador no processo de deposição, isto porque, além do papel que desempenha ao nível da floculação, apresenta um efeito inibidor da sedimentação, para suspensões muito concentradas. Nestes casos, os flocos encontram-se tão próximos que o fluido que se encontra entre eles é forçado a escoar-se para cima, diminuindo assim a velocidade de queda.

O leito de sedimentos, em ambientes aquáticos, tem que ser interpretado obviamente nas suas duas componentes: o sedimento seco propriamente dito e a água intersticial que ocupa os espaços vazios entre os sedimentos. O perfil do leito de sedimentos depende essencialmente da concentração de sedimentos junto ao fundo e da velocidade horizontal da água nessa zona. Para baixas concentrações os sedimentos depositam-se diretamente no leito formando um depósito onde a densidade e a tensão podem aumentar rapidamente com a profundidade. Para ambientes com maiores concentrações, a transição entre a coluna de água e o sedimento é feita por uma suspensão densa, denominada de lama fluida, que dependendo da sua concentração pode ser móvel ou estacionária. A formação desta camada está relacionada com o fato de por vezes a taxa de deposição ser superior à taxa de consolidação ou pela fluidização do leito por ação do escoamento da água junto ao fundo. A consolidação consiste basicamente na formação de estruturas, ou agregação de sedimentos, gradualmente mais densas, com expulsão das águas intersticiais. O processo pode ser caracterizado pelo colapso de uma partícula para um interstício ocupado por água, que inicialmente suportava o seu peso, sendo esta expelida no sentido ascendente. A consolidação acontece quando a pressão intersticial é superior à hidrostática devido ao peso das partículas sólidas que se encontram acima e às forças de atrito no escoamento em meio poroso, cessando quando estas forem iguais. Este processo é por norma muito lento, isto porque, ao se produzir um perfil vertical de densidade que aumenta com a profundidade, os poros para a água intersticial se escoar diminuem com o aumento da densidade, impedindo maior consolidação das camadas mais profundas.

As ondas geradas pelo vento são o principal responsável pela geração da força de atrito necessária para erodir os sedimentos no fundo. Sob a influência dessas forças geradas pelo vento, a água nas zonas rasas próximas às margens torna-se turva devido à ressuspensão de partículas do sedimento presente no fundo do lago agitado. Ventos fortes podem perturbar colunas inteiras de água em zonas costeiras rasas e causar a ressuspensão de partículas de lama devido às correntes e principalmente às ondas geradas pelo vento. Partículas minerais ressuspensas, rapidamente se assentam novamente no fundo quando o vento cessa, mas partículas orgânicas, tendem a permanecer mais tempo na água onde estão sujeitas à decomposição microbiana e juntamente com a água intersticial liberada, enriquecem a água com nutrientes.

4.3. Efeito da ressuspensão de sedimentos na qualidade da água

As concentrações de sedimentos são geralmente maiores quanto menor for o tamanho das partículas. As concentrações tendem a diminuir levemente com o aumento da profundidade a partir da superfície do sedimento. Nos locais onde o fundo de um lago está coberto com lama de granulação fina (argila ou lodo) mais nutrientes são supridos para a camada de água acima, que poderá tornar-se eutrófica e mais produtiva. Posteriormente, a matéria orgânica produzida é depositada no fundo e continuará enriquecendo o sedimento com nutrientes. A continuidade da interação água/sedimento tende a aumentar a diferença na qualidade da água entre zonas litorâneas cobertas com sedimentos de partículas de diferentes tamanhos.

As concentrações de nutrientes na água intersticial são normalmente mais elevadas na superfície do sedimento do que em camadas mais profundas e os nutrientes são liberados para a água por difusão. Os ventos, ao agitarem as partículas dos sedimentos, resultam em um retorno mais eficiente dos nutrientes dos sedimentos para a coluna d'água.

Quando a parte inferior da coluna d'água encontra-se com baixas concentrações de oxigênio ou mesmo anaeróbia ocorrem as maiores taxas de liberação de nutrientes do sedimento, favorecendo a solubilização e precipitação de íons, especialmente sob a forma de óxidos. Situações de baixas concentrações de oxigênio são observadas quando ocorre intensa atividade biológica e respiração de organismos bentônicos no sedimento. As bolhas de gás formadas principalmente por gás carbônico, metano, gás sulfídrico e nitrogênio, liberadas do sedimento tem grande importância para a reciclagem de nutrientes e representa um dos principais mecanismos de fertilização dos lagos. Em condições aeróbias esses processos de liberação de gases são menos intensos que em condições de anaerobiose.

Durante a noite ocorre a redução na concentração de oxigênio dissolvido na Lagoa devido ao elevado consumo indicando que a produção fotossintética que ocorre durante o dia não é suficiente para manter o sistema com grau satisfatório de oxigenação, demonstrando a instabilidade do sistema, onde a ressuspensão de sedimento ou aporte através de drenagens pode afetar a oxigenação das águas. Os déficits de oxigênio dissolvido são controlados pelas carências oriundas da decomposição bioquímica da matéria orgânica lançada na laguna através das águas residuais e dos sedimentos. Quaisquer fatores que interfiram na produção fotossintética das algas podem resultar em desequilíbrio na disponibilidade de oxigênio dissolvido no sistema e para atingir condições de equilíbrio mais estável em relação à oxigenação das águas, é necessária a redução do aporte de matéria orgânica oxidável, que resultará na redução da disponibilidade de nutrientes.

Na camada superficial dos sedimentos, a decomposição da matéria orgânica por microrganismos esgota o oxigênio dissolvido na água intersticial. Se o fluxo difusivo do oxigênio, a partir da superfície não for suficiente para satisfazer o seu consumo, os microrganismos passam a consumir outros compostos por forma a continuarem a degradação. Começam então por utilizar nitratos, reduzindo-os. Esgotados estes rapidamente, passam a usar como fonte os óxidos de manganês e de ferro, mudando em seguida para os sulfatos, abundantes nestes ambientes. A decomposição faz-se então por intermédio de bactérias sulfatoredutoras produzindo ácido sulfídrico. Atingindo-se condições anóxicas, o processo de obtenção de energia por parte das bactérias, passa a ser efetuado através da fermentação, com a respectiva produção de metano. A diminuição do oxigênio dissolvido na água intersticial faz com que os óxidos de ferro e manganês se reduzam (Fe(III) a Fe(II)), provocando a libertação dos metais a estes ligados. Os metais livres difundem-se, então, para as camadas superiores. Se estas contiverem ainda oxigênio, os metais são readsorvidos ou coprecipitam com óxidos de ferro e manganês. O mesmo pode acontecer quando em situações de elevados fluxos erosivos, os metais são de novo remobilizados para zonas oxigenadas e dissolvidos na coluna de água, tornando-se mais disponíveis. A formação de metano no processo de fermentação pode levar à acumulação deste gás em bolsas no seio dos sedimentos. Estas bolhas, ao atingirem uma pressão crítica, podem arrebentar provocando quer o aumento dos processos difusivos quer, possivelmente, a ressuspensão de sedimentos para a coluna de água, com todas as implicações associadas.

5. MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA DA RESSUSPENSÃO DE SEDIMENTOS DO FUNDO DE CORPOS D'ÁGUA RASOS

5.1. Introdução

O entendimento dos padrões de circulação, transporte e ressuspensão de sedimentos nos ambientes lagunares é essencial para a compreensão de problemas ecológicos, do funcionamento do ecossistema, da sua produtividade.

O estudo da ressuspensão de sedimentos na área de interesse da Lagoa Rodrigo de Freitas foi realizado através da aplicação de um modelo matemático composto por equações que permitem o cálculo de parâmetros que descrevem o padrão de ondas provocado pelo vento sobre a superfície do corpo d'água e das variáveis que determinam o movimento das partículas no meio, em condições de contorno pertinentes.

Os modelos matemáticos são ferramentas cada vez mais procuradas e utilizadas na gestão da qualidade da água, como instrumento de apoio à decisão, na medida em que são capazes de prever os impactos relativos a essas decisões, bem como de ajudar ao estabelecimento de soluções com vista à proteção ambiental. O desenvolvimento destes modelos e a sua aplicação aos sistemas lagunares passam necessariamente pelo estudo destes complexos sistemas e pela definição dos parâmetros mais importantes que influenciam a dinâmica dos sedimentos.

5.2. Geração de ondas pelo vento

O vento, arrastando as águas superficiais produz corrente. Quando ocorre a inversão do vento devido à entrada de uma frente fria por exemplo, a corrente também se inverte. As ondas geradas pelo vento são as principais responsáveis pela ressuspensão de sedimentos presentes no fundo de corpos aquáticos. Soprando sobre a superfície de uma massa líquida arrasta a película superficial com uma força:

$$T = k\rho_1 V_w^2 \quad (5.1)$$

onde ρ_1 é densidade do ar, V_w é a velocidade do vento medida a 10 metros de altura e k é o coeficiente de resistência friccional da água, que depende da rugosidade da superfície e que também depende do vento, uma vez que esse é pulsativo e as pulsações agitam a água.

Os corpos d'água são sede de ondulações complexas, desobedientes, entretanto, por mais desordenada que parece essa agitação, ela é realmente constituída pela superposição de sistemas simples e regulares, ou seja, ondas elementares. Para águas rasas, a teoria referente ao comportamento de uma onda senoidal descreve satisfatoriamente o comportamento de ondas geradas pelo vento. A Figura 5.1. representa a propagação de uma onda senoidal e suas propriedades.

As ondas parecem avançar segundo uma determinada velocidade C (celeridade), na verdade não é a massa que avança, mas apenas a deformação. A celeridade descreve a distância percorrida por uma onda durante um período que corresponde a um comprimento de onda. A equação que representa a celeridade de uma onda através de seu comprimento e da profundidade é descrita por:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)} \quad (5.2)$$

Um dos fatores que define o comportamento de uma massa líquida como sendo águas rasas é a relação entre a profundidade e o comprimento de onda, ou seja, $2\pi D/L < 1/4$ ou $D/L < 1/25$, sendo a $\tanh(2\pi D/L) \approx 1$, podendo a equação 5.2 ser simplificada para:

$$C = \sqrt{gD} \quad (5.3)$$

O que significa dizer que quando uma onda se propaga em águas rasas, a celeridade é função apenas da profundidade.

As partículas descrevem círculos fechados, que se reduzem exponencialmente com a profundidade até virtualmente desaparecerem à profundidade de meio comprimento de onda. As partículas não estão em fase, por isso ocorre a deformação. O avanço das partículas em suas órbitas fechadas faz avançar a deformação. A superposição de vários sistemas como este, mas com características diversas e, sobretudo, direções diferentes, deforma caprichosamente a superfície do corpo d'água.

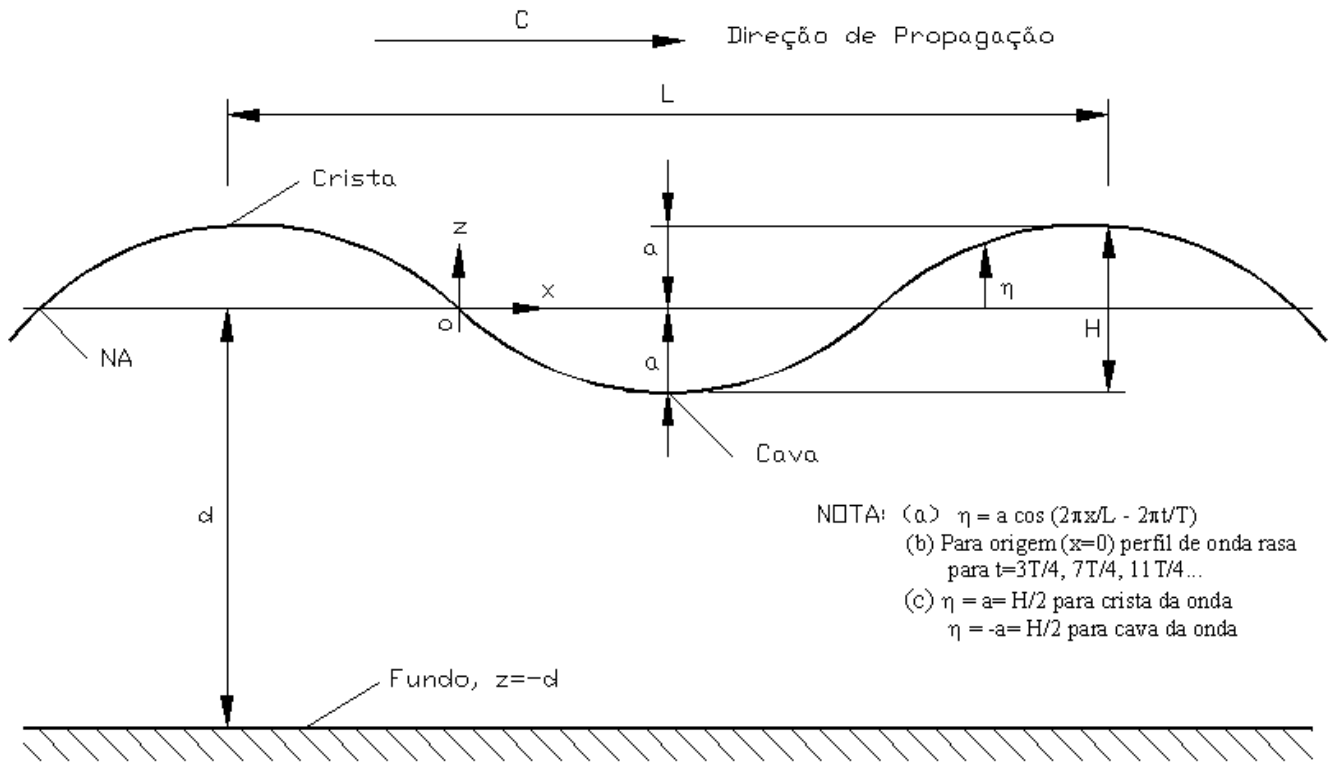


Figura 5.1. Definição dos termos elementares de uma onda senoidal progressiva (CERC, 1975)

Uma vez geradas, as ondas mantêm suas trajetórias, mesmo fora da área de ação do vento. Uma onda se modifica a partir do momento em que começa a sentir o efeito do fundo. Isso ocorre quando a profundidade da água é igual ou inferior a 1/4 do comprimento da onda. O comprimento de uma onda é medido pela distância entre duas cristas sucessivas, que é função da celeridade C e do período T :

$$L_w = CT = \sqrt{gD} \times T \quad (5.4)$$

Seguindo o princípio de conservação de energia, a queda na velocidade de propagação das ondas em função da diminuição de profundidade provoca o crescimento em altura. A capacidade de uma onda realizar trabalho - como mobilizar sedimentos - depende de sua energia, que é função direta da altura da onda.

A definição de parâmetros que caracterizam o “estado de mar” ou comportamento da massa líquida é de fundamental importância. Através desses parâmetros pode-se determinar o movimento ou estado de agitação que será gerado na superfície do corpo d’água provocado pela força produzida pela velocidade do vento. Um destes parâmetros abrange o conceito de altura da onda significativa ou simplesmente altura significativa (H_s), que é definida como a média de um terço das maiores ondas registradas. Um outro parâmetro diz respeito ao período significativo (T_s), que pode ser obtido pela observação visual, tomando-se a média dos períodos de 10 a 15 ondas proeminentes sucessivas. O cálculo da altura significativa e período significativo de onda esta descrito segundo o Shore Protection Manual (1975) pelas seguintes equações:

$$\frac{gH_s}{V_w^2} = 0.283 \tanh \left[0.530 \left(\frac{gD}{V_w^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left\{ \frac{0.00565 \left(\frac{gF}{V_w^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0.530 \left(\frac{gD}{V_w^2} \right)^{3/4} \right]} \right\} \quad (5.5)$$

$$\frac{gT_s}{V_w} = 7.54 \tanh \left[0.833 \left(\frac{gD}{V_w^2} \right)^{3/8} \right] \tanh \left\{ \frac{0.0379 \left(\frac{gF}{V_w^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[0.833 \left(\frac{gD}{V_w^2} \right)^{3/8} \right]} \right\} \quad (5.6)$$

Onde V_w a velocidade do vento (m/s) e F é a pista (m).

A pista (F) é a distância compreendida entre um ponto da superfície líquida e um ponto do contorno do corpo d’água com direção e sentido iguais ao da intensidade do vento. É o vetor que representa o caminho percorrido pelo vento sobre a superfície líquida. Quando um vento começa a soprar sobre a superfície da água, gera a um tempo uma corrente e pequenas rugosidades, as ondas, que alimentadas pela energia do vento, crescem em comprimento, altura, celeridade e período. Verifica-se que a qualquer distância da borda do corpo d’água, as ondas primeiro crescem com o tempo, mas chega a uma determinada distância, em que não podem mais crescer com o tempo, estando limitadas à distância da borda. Essa distância chama-se pista. Se a ação do vento é suficientemente duradoura e com suficiente espaço a

barlavento (duração e pista), o vento consegue transferir um máximo de energia para a massa d'água. Insuficiência de pista ou de duração reduz a transferência de energia. É por isso que ondas geradas numa lagoa não atingem o mesmo desenvolvimento que no mar por falta de espaço mínimo para a formação da pista. O período das ondas (tempo entre a passagem de duas cristas consecutivas em um determinado ponto fixo) é maior para maiores pistas.

As ondas aparecem como um resultado de forças restauradoras em um fluido que foi retirado de seu estado de equilíbrio inicial. O modelo clássico no estudo de ondas para dinâmica dos fluidos considera a onda ideal do tipo senoidal. Essa aproximação simplifica a progressão da onda sobre a superfície, mesmo quando são irregulares. Seus tipos irregulares aparecem constantemente modificados na superfície, de maneira a serem sempre sobrepostas por outras. Desta forma, qualquer onda observada é na verdade o somatório de várias ondas com alturas, comprimentos de onda e frequências diferentes. E o ângulo de fase permite as várias defasagens de ondas, isto é, permite que o máximo ocorra em diferentes horários. Quando uma onda se propaga, as partículas de água também se movimentam para frente e para trás, descrevendo elipses verticais que por sua vez tornam-se exponencialmente menores conforme aumenta a profundidade. A Figura 5.2. mostra o deslocamento de uma partícula sobre a ação da componente horizontal da velocidade.

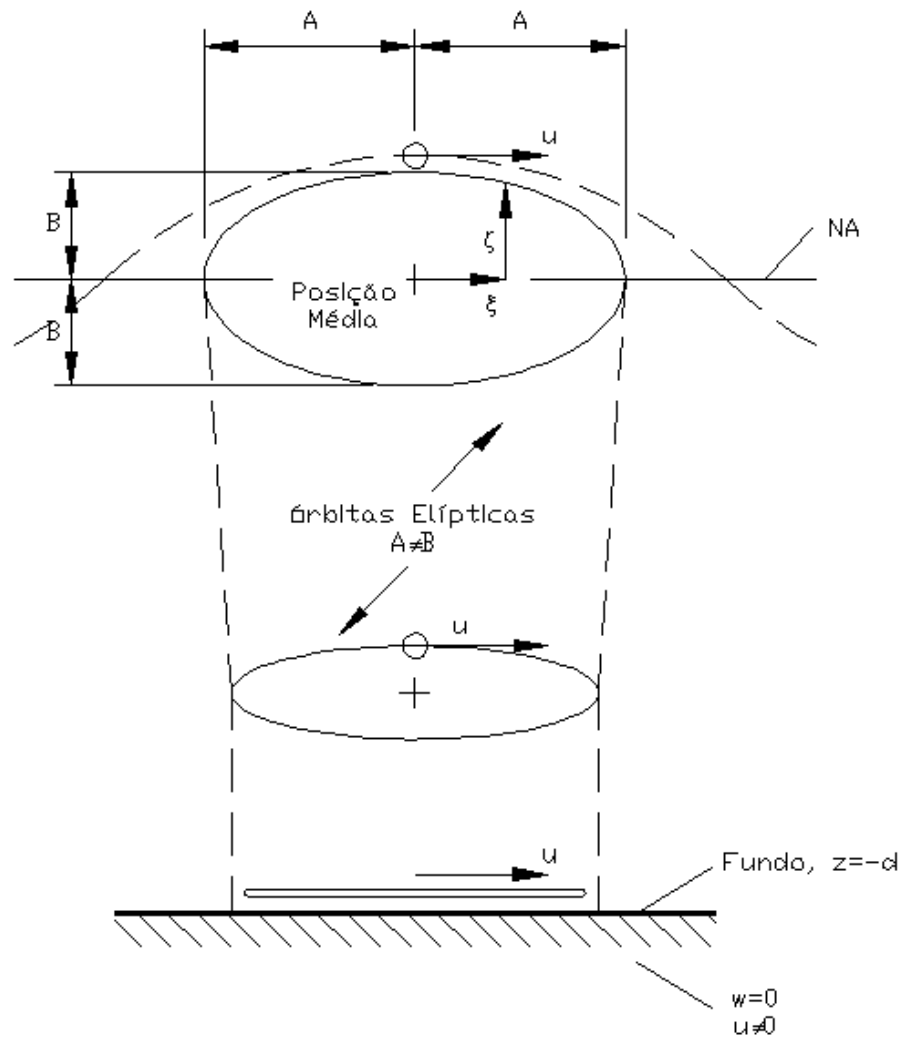


Figura 5.2. Deslocamento de uma partícula em águas rasas (CERC, 1975)

A amplitude do deslocamento horizontal de uma partícula é função da altura da onda H_s , do seu comprimento L_w , da sua profundidade D , e pode variar verticalmente na coluna d'água segundo a expressão (CERC, 1975):

$$\xi = + \frac{H_s}{2} \frac{\cosh[2\pi(z+D)/L_w]}{\sinh(2\pi D/L_w)} \sin\left(\frac{2\pi x}{L_w} - \frac{2\pi t}{T_s}\right) \quad (5.7)$$

Para partículas com deslocamento próximo ao fundo, a equação 5.7 é simplificada e a amplitude é determinada através da equação:

$$A_b = \frac{H_s}{2} * \frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi * D}{L_w}\right)} \quad (5.8)$$

Outro aspecto importante a ser descrito é o desenvolvimento ou movimento individual de uma partícula no meio fluido. As partículas em meio fluido se movem geralmente segunda uma trajetória elíptica, quando em águas rasas, sobre a ação de uma velocidade com componentes horizontal e vertical. Para este estudo, a componente horizontal da velocidade é de grande importância uma vez que a tensão de cisalhamento atuante no fundo, capaz de promover a ressuspensão de sedimentos, é função direta desta componente. A componente horizontal da velocidade ou velocidade orbital é descrita pela equação:

$$U_{bw} = \frac{\pi * H_s}{T_s} * \frac{\cosh[2\pi(z+D)/L_w]}{\sinh(2\pi D/L_w)} * \cos\left(\frac{2\pi x}{L_w} - \frac{2\pi t}{T_s}\right) \quad (5.9)$$

Essa equação representa a velocidade orbital de uma partícula no fluido para uma distância qualquer $(z+D)$ acima do fundo. A velocidade é harmônica tanto para x como para t . Quando $z = -D$, a partícula encontra o fundo e a velocidade orbital é máxima para $x=L_w$ e $t=T_s$ e a equação 5.9 é simplificada:

$$U_{bw} = \frac{\pi * H_s}{T_s} * \frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi * D}{L_w}\right)} \quad (5.10)$$

A tensão de cisalhamento no fundo é função da densidade da água ρ_w , da velocidade orbital máxima U_{bw} e de um coeficiente de fricção f_w que depende do Número de Reynolds, da rugosidade do fundo k e da amplitude da onda A_b . O Número de Reynolds é determinado pela expressão:

$$\text{Re} = \frac{U_{bw} * A_b}{\nu} \quad (5.11)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática da água.

O coeficiente de fricção f_w deve ser determinado de acordo com o tipo de escoamento.

As equações a seguir definem f_w para cada tipo de escoamento:

$$\text{Escoamento laminar: } f_w = 0,10 * \text{Re}^{-0,23} \quad (5.12)$$

$$\text{Escoamento turbulento: } f_w = 0,71 * \left(\frac{k}{A_b} \right)^{0,31} \quad (5.13)$$

Em lagos rasos, as tensões de cisalhamento estão associadas às correntes horizontais provocadas pelo vento, que causam a redistribuição de partículas para a coluna d'água e influenciam na concentração de sólidos em suspensão. A ressuspensão de sedimentos é função da tensão de cisalhamento no fundo devido ao movimento do fluido e às características do sedimento.

A tensão crítica de cisalhamento no fundo de um lago provocada pelas ondas geradas pelo vento, em N/m², é descrita pela equação:

$$\tau_w(t) = \rho_w * f_w * \left[U_{bw} * \cos\left(\frac{2\pi * t}{T_s}\right) \right]^2 \quad (5.14)$$

Para $t=0 \pm 2\pi$, τ_w é máxima, logo:

$$\tau_w = \rho_w * f_w * U_{bw}^2 \quad (5.15)$$

Quando uma partícula está no interior de um meio aquoso com determinada viscosidade fica sujeita a três forças: gravidade, impulsão e arrastamento pela ação do atrito. A força da gravidade atua no sentido descendente. A força da impulsão é gerada pela massa do líquido deslocado pelo volume da partícula sólida e atua no sentido ascendente. A força do arrastamento é função da viscosidade, das dimensões das partículas e é sempre oposta à direção da velocidade. A sedimentação de partículas ocorre quando a força da gravidade

excede as forças de inércia e de viscosidade. As partículas, ao sedimentarem, ligam-se umas às outras por um processo de coesão e formam flocos ou partículas de diâmetros maiores. Essas partículas maiores precisam de uma tensão maior para provocar a sua ressuspensão. No fundo dos lagos, os sedimentos depositados estão distribuídos segundo camadas com densidades diferentes. Quanto menor a profundidade da camada, menos densa ela será. Na camada superior dos sedimentos depositados no fundo de um lago, a tensão para ressuspender as partículas é menor. Para determinar a tensão de cisalhamento necessária para revolver as camadas de sedimentos se faz necessário o conhecimento da viscosidade. Este trabalho não se deteve na obtenção de dados de viscosidade, mas apenas dimensionar a tensão de cisalhamento gerada no fundo da lagoa a partir das forças atuantes sobre o sedimento com valores estimados para a viscosidade. A Figura 5.3. mostra a relação entre a viscosidade e a tensão crítica de cisalhamento para mais de um tipo de sedimentos em alguns lagos.

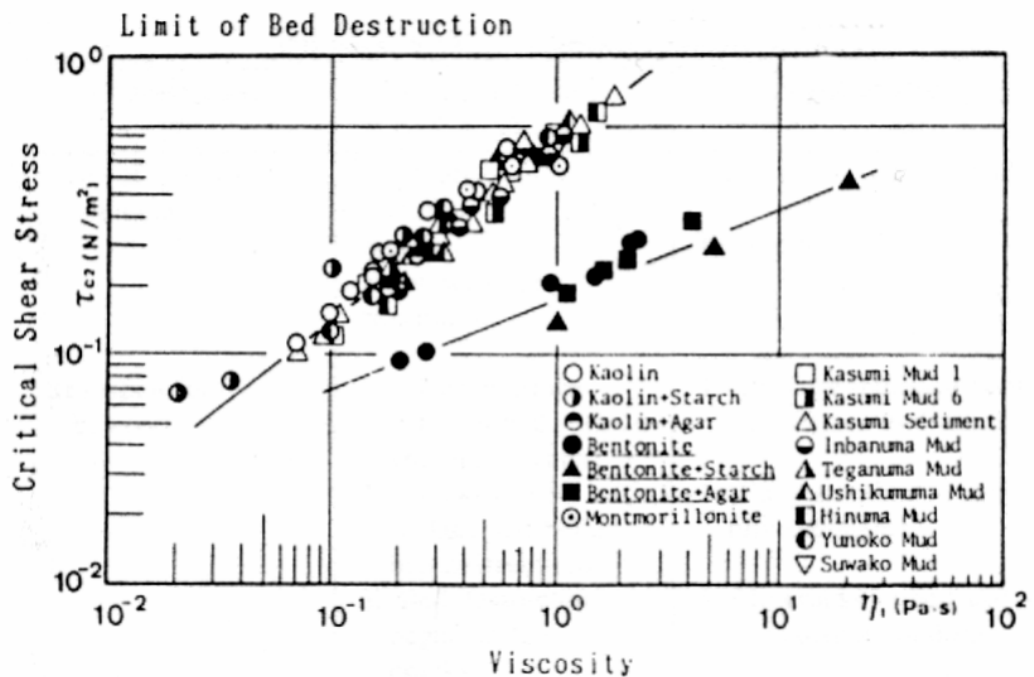


Figura 5.3. Relação entre a tensão crítica de cisalhamento e a viscosidade do sedimento para dois tipos de lodo (Otsubo & Muraoka, 1988)

6. APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO À LAGOA RODRIGO DE FREITAS

6.1. Características físicas do domínio e parâmetros do modelo

As informações relativas à discretização espacial para este estudo foram as utilizadas por Martins (1999) segundo um domínio bidimensional horizontal representado por uma malha retangular com intervalos de discretização uniformes de 32 metros tanto para a direção x quanto y. Foi considerado o contorno fechado, não sendo considerado o Canal do Jardim de Alah. A discretização resultou em uma malha com 2355 pontos no plano x-y, com dados batimétricos para cada ponto da malha como ilustrado na figura 6.1 a seguir.

Alguns parâmetros do modelo são necessários para definir a modelagem na Lagoa Rodrigo de Freitas. Não foram feitas medições de campo para determinação destes parâmetros uma vez que seria necessário um levantamento minucioso e custoso, em um intervalo de tempo que assegurasse a confiabilidade dos dados obtidos, cuja disponibilidade não estava prevista para este projeto. Portanto, foram estabelecidos valores que se enquadram na realidade da área de estudo em questão, mas que não são os valores médios precisos. Para a densidade da água ρ_w foi adotado o valor de 1.000 Kg/m³ e para a viscosidade cinemática da água ν , adotado o valor de 10⁻⁶ m/s. Para a rugosidade do fundo k foi admitido o valor de 0,01 m.

A aceleração da gravidade considerada para este estudo foi 9,81 m/s.

6.2. Simulação numérica para cálculo das tensões críticas de cisalhamento

O modelo elaborado para este estudo foi desenvolvido em linguagem FORTRAN, versão 6.0A e os resultados tratados graficamente no programa Surfer, versão 7.0.

Para a simulação com o modelo matemático foram utilizados três arquivos com informações sobre a área de estudo com dados de cada ponto da malha, informações sobre a discretização da malha, dados de cada ponto do contorno. O arquivo de dados para os pontos da malha tem as coordenadas x e y de cada ponto e a profundidade destes pontos. O arquivo de discretização da malha trás informações sobre o número de pontos da malha, os valores máximos das coordenadas x e y e o intervalo entre os nós da malha. O arquivo de dados para os pontos do contorno trás as coordenadas dos pontos de contorno.

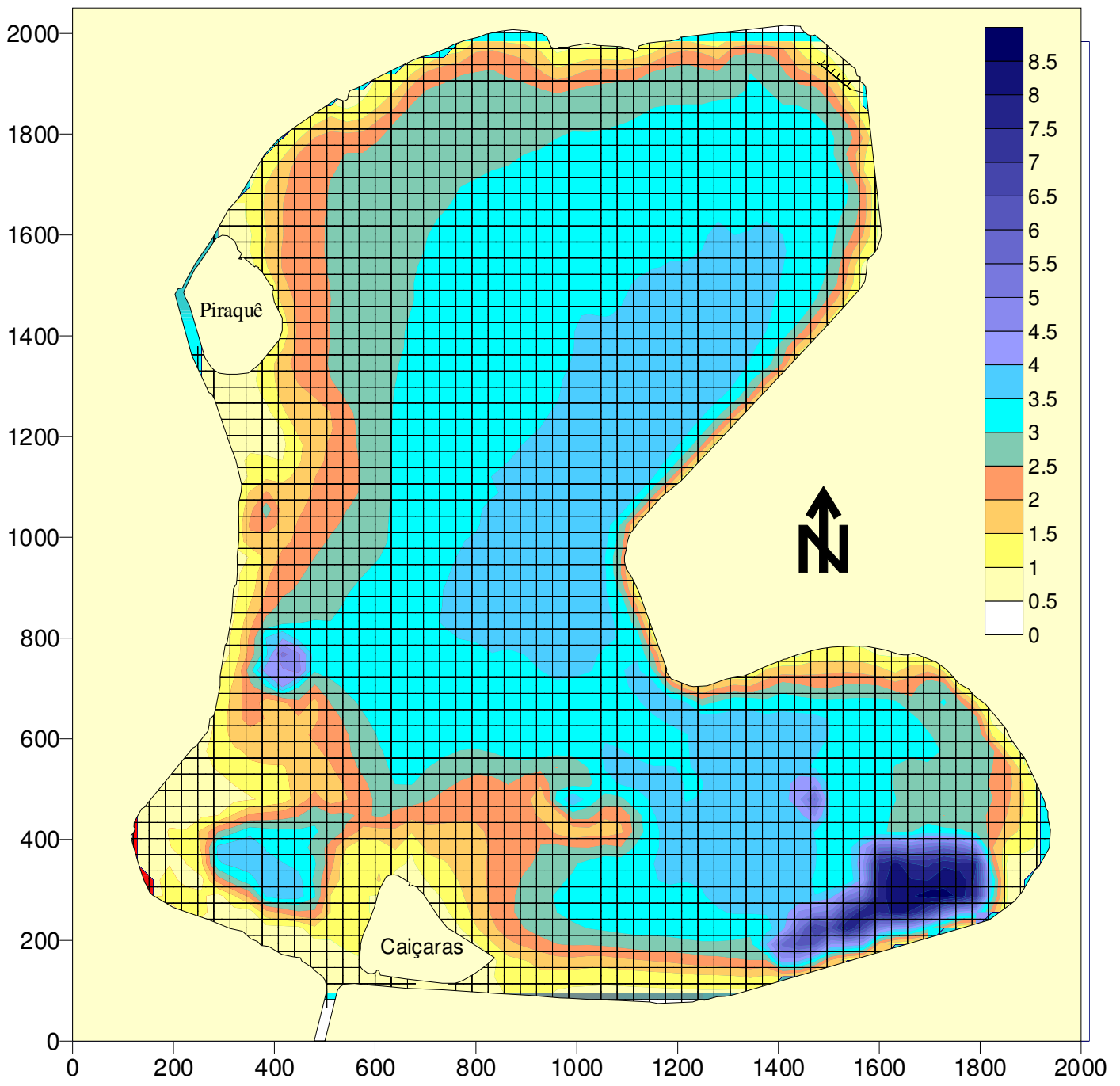


Figura 6.1. Batimetria da Lagoa Rodrigo de Freitas e representação da malha numérica no plano x - y (coordenadas em metros)

A partir da leitura desses arquivos são solicitados ao usuário do modelo, informações sobre a direção do vento, ou seja, ângulo que o vento faz com a direção Norte e a intensidade deste vento atuante na área de interesse. Para a direção do vento especificada são calculadas as pistas para cada ponto da malha.

Para cada ponto da malha serão calculados a altura significativa de onda e o período significativo através das equações 5.5 e 5.6, cujas variáveis são a velocidade do vento, a pista e a profundidade do ponto da malha. Calculado o período significativo, procede-se ao cálculo do comprimento de onda através da equação 5.4 que é função deste e também da profundidade do ponto da malha e também ao cálculo da velocidade orbital máxima através da equação 5.10.

Através dos valores obtidos para o comprimento de onda, determinam-se os valores para a amplitude da onda pela equação 5.8. A amplitude da onda permite o cálculo do Número de Reynolds (equação 5.11) e a determinação do tipo de escoamento segundo o cálculo do coeficiente de fricção como demonstrado nas equações 5.12 e 5.13.

Os valores obtidos para a velocidade orbital máxima e o coeficiente de fricção, juntamente com o valor estabelecido para a densidade da água, são aplicados à equação 5.15 para obtenção dos valores das tensões de cisalhamento atuantes no fundo da lagoa.

O modelo gera um arquivo de dados com os resultados obtidos através da simulação acima descrita permitindo que sejam gerados arquivos gráficos que facilitam a interpretação destes resultados.

6.3. Resultados dos casos estudados

Para a Lagoa Rodrigo de Freitas foram feitas simulações com intensidades do vento igual a 4, 6, 8 e 10 m/s e direção proveniente de sul e nordeste. Os valores referentes à intensidade do vento escolhidos para a simulação não foram obtidos através de medições *in loco*, mas estão de acordo com os valores conhecidos para a região do Rio de Janeiro. As direções escolhidas representam os ventos mais comuns na região e que apresentam maior frequência com maiores intensidades, representando as mudanças climáticas quando da entrada de frentes frias.

É possível observar que os valores obtidos para as pistas, tanto para direção sul quanto para direção nordeste, apresentam a mesma ordem de grandeza e como são função das coordenadas dos pontos da malha e do contorno, não se faz necessária a comparação dos

resultados para intensidades de vento diferentes. Os resultados obtidos para altura significativa, período significativo e tensão de cisalhamento são comparados segundo uma mesma direção e para as quatro intensidades de vento.

Comparando os valores obtidos para altura significativa de onda e período significativo para as quatro intensidades de vento em cada uma das direções, pode-se observar que quanto maior a intensidade do vento, maiores são os valores obtidos para altura e período significativos. O mesmo ocorre com os valores obtidos para a tensão de cisalhamento, ou seja, quanto maior a intensidade, maior a tensão de cisalhamento.

Não existem dados disponíveis para a tensão crítica de cisalhamento na Lagoa Rodrigo de Freitas e a determinação destes valores depende fundamentalmente do tipo e quantidade de sedimentos presente no fundo e suas características e concentração como explicitado no item 4.2, não sendo objeto de estudo deste trabalho. Vários autores se propuseram a pesquisar valores para a tensão crítica de cisalhamento em ambientes lagunares e relacioná-lo com a tensão no fundo capaz de ressuspender os sedimentos. Alguns dos valores obtidos experimentalmente para a tensão crítica cisalhamento por Otsubo & Murakoa (1988) podem ser observados na Figura 5.3. que demonstra que essas tensões apresentam valores entre 10^{-1} e 1. Desta maneira, foi admitido para este estudo o valor médio de $0,5 \text{ N/m}^2$ para a tensão crítica capaz de ressuspender os sedimentos do fundo da Lagoa. Para o valor da tensão crítica tomado como referência, pode-se afirmar que ventos com intensidade de 4 m/s já são suficientes para ressuspender os sedimentos do fundo da lagoa e disparar os processos físico-químicos e biológicos decorrentes da disponibilização deste material para a coluna d'água. Os ventos com intensidades de $6, 8$ e 10 m/s provocam grandes tensões que provavelmente revolveriam e ressuspenderiam várias camadas de sedimentos. Diferenças significantes também podem ser observadas com relação às áreas de atuação das tensões. Quanto maior a intensidade do vento, maiores as tensões e maiores também são as áreas em que a tensão atuante no fundo ultrapassa o valor admitido para a tensão crítica.

Para a direção nordeste, quando a intensidade do vento é de 4 m/s , apenas uma pequena área na porção sudoeste é afetada por tensões acima do valor crítico. A medida em que a intensidade do vento aumenta, a porção sul e a porção sudoeste-oeste (entre as ilhas Caiçaras e Piraquê) apresentam tensões acima do valor crítico. Para a intensidade do vento de 10 m/s , mais da metade da área do fundo da Lagoa está submetida a tensões capazes de ressuspender os sedimentos. Ventos com intensidades acima de 6 m/s acarretariam grandes impactos ao ecossistema.

Para ventos com direção sul e intensidade de 4 m/s, as tensões praticamente não ultrapassam a tensão crítica. A partir de 6 m/s, pequenas áreas na porção norte-noroeste e na porção inferior à ilha Piraquê, apresentam valores acima da tensão crítica. Com o aumento da intensidade do vento essas áreas vão aumentando e para intensidade de 10 m/s há também uma grande área do fundo submetida a grandes tensões podendo comprometer de maneira significativa, a qualidade de água da Lagoa.

Foram feitas ainda, simulações para intensidade do vento igual a 10 m/s nas direções sul e nordeste com variação do nível d'água da Lagoa. A variação do nível d'água foi considerado 0,30 m acima do nível d'água atual e 0,30 m abaixo. Para ambas as direções de vento, pode-se observar que quando o nível d'água está abaixo do atual, as tensões são maiores que as encontradas para o nível d'água atual e quando o nível d'água está acima do atual, as tensões são menores.

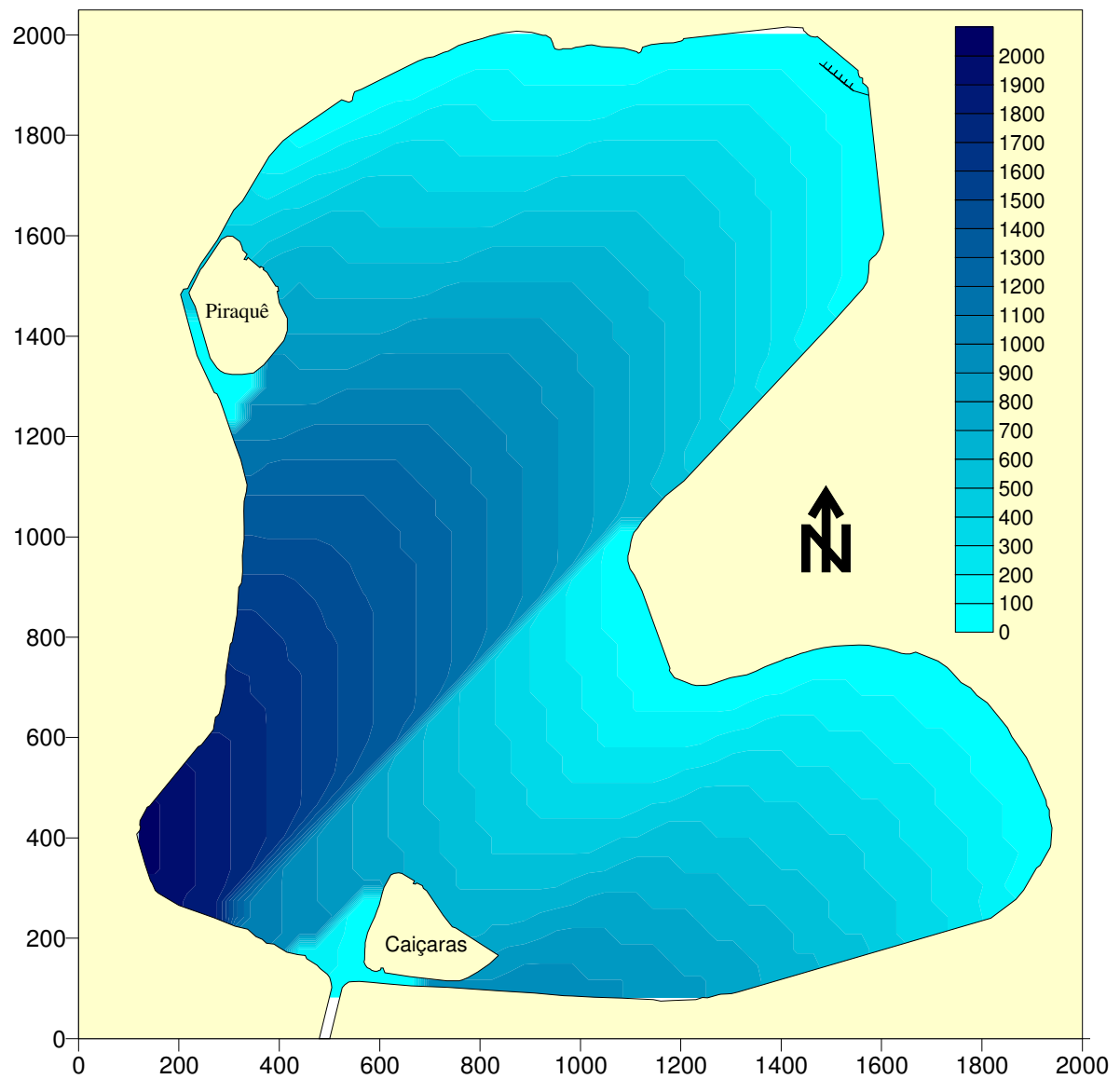


Figura 6.2. Pistas para vento a 45° em metros

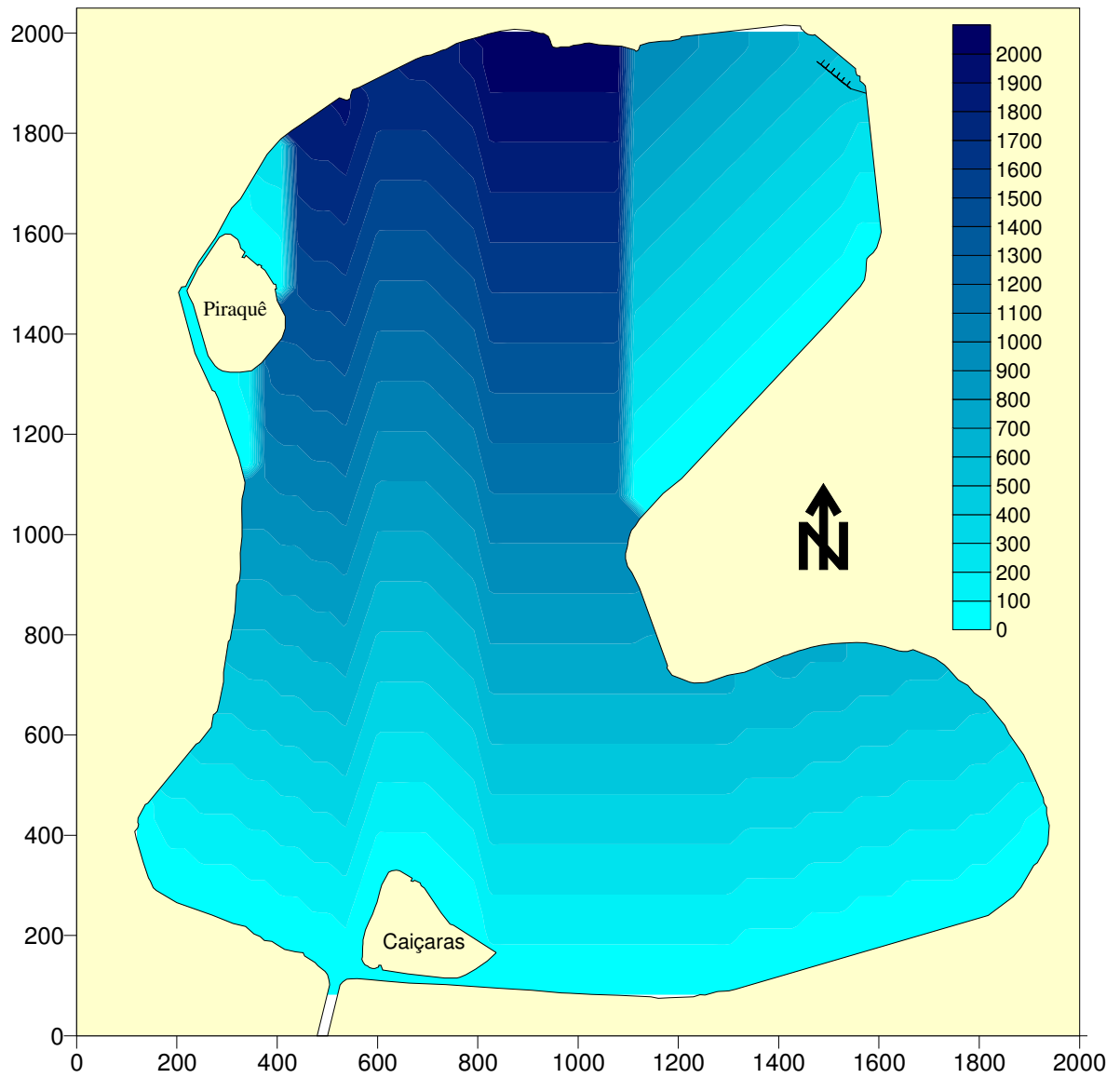
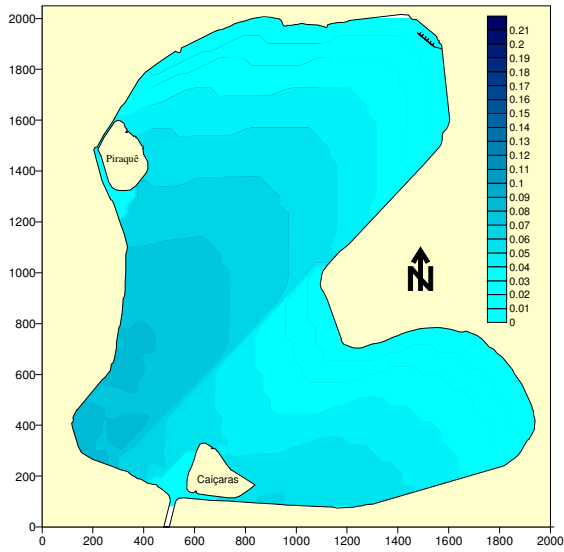
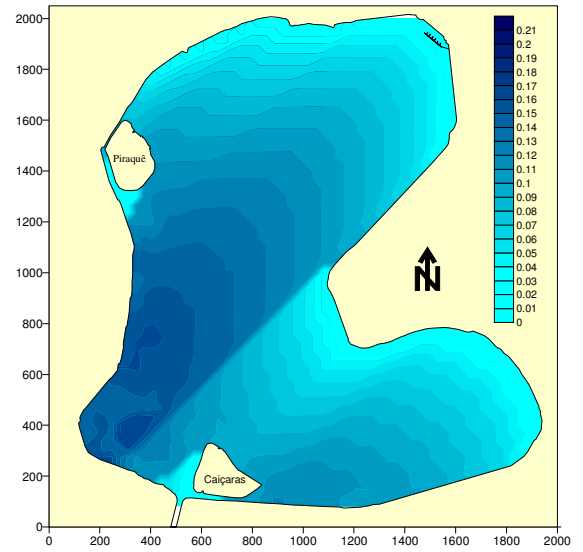


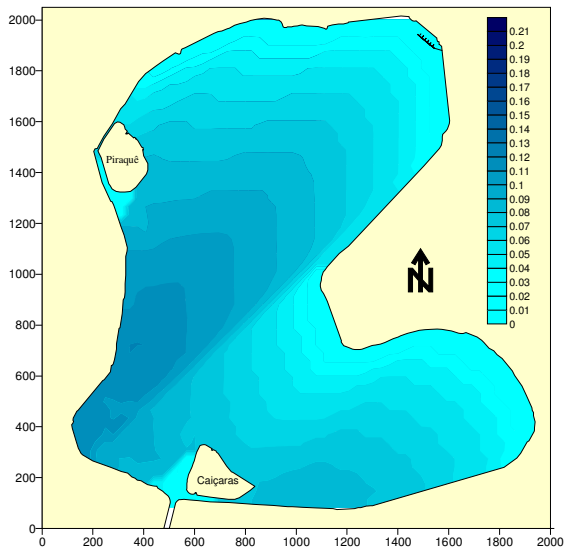
Figura 6.3. Pistas para vento a 180° em metros



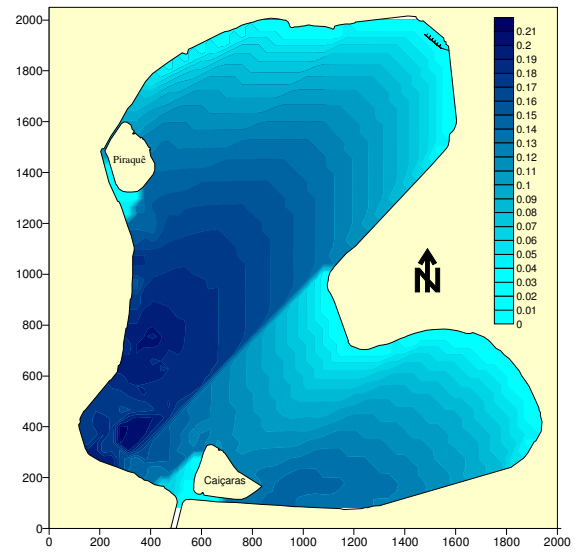
Altura significativa de onda para vento a 45° e intensidade de 4 m/s



Altura significativa de onda para vento a 45° e intensidade de 8 m/s

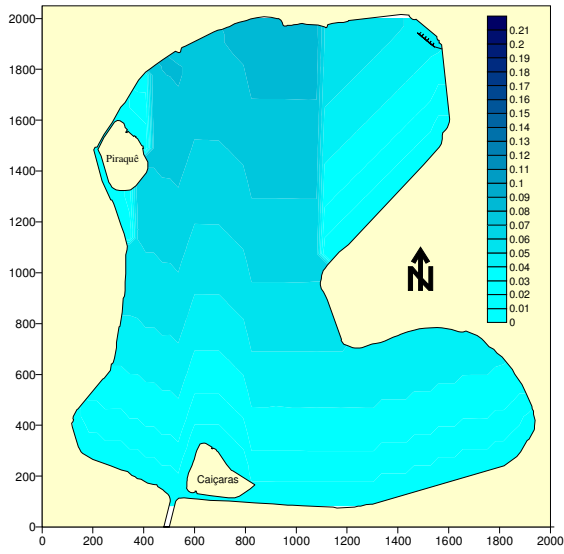


Altura significativa de onda para vento a 45° e intensidade de 6 m/s

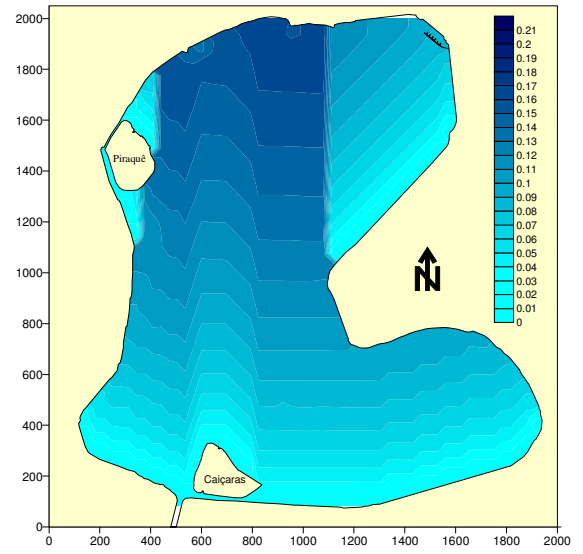


Altura significativa de onda para vento a 45° e intensidade de 10 m/s

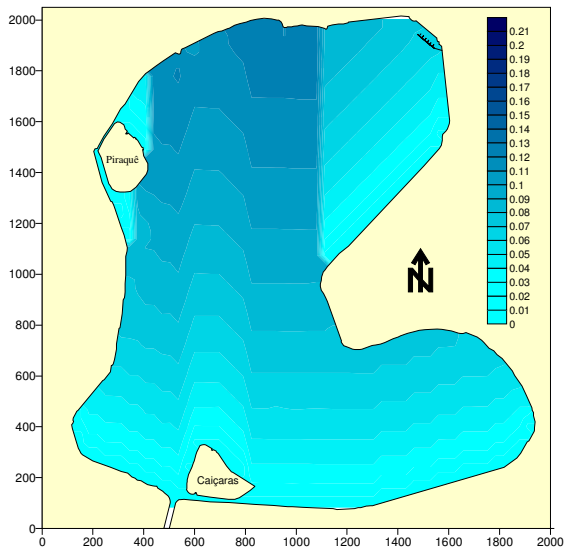
Figura 6.4. Alturas significativas de onda para vento a 45° em metros



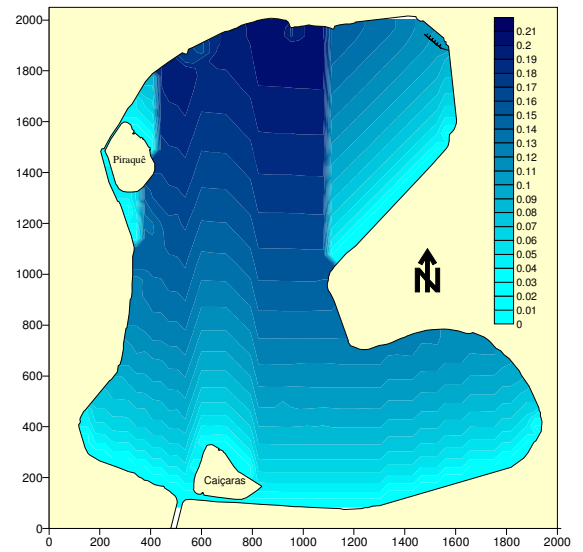
Altura significativa de onda para vento a 180° e intensidade de 4 m/s



Altura significativa de onda para vento a 180° e intensidade de 8 m/s

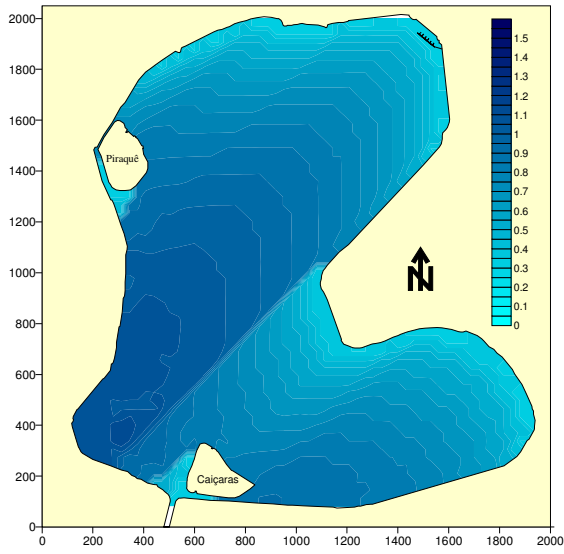


Altura significativa de onda para vento a 180° e intensidade de 6 m/s

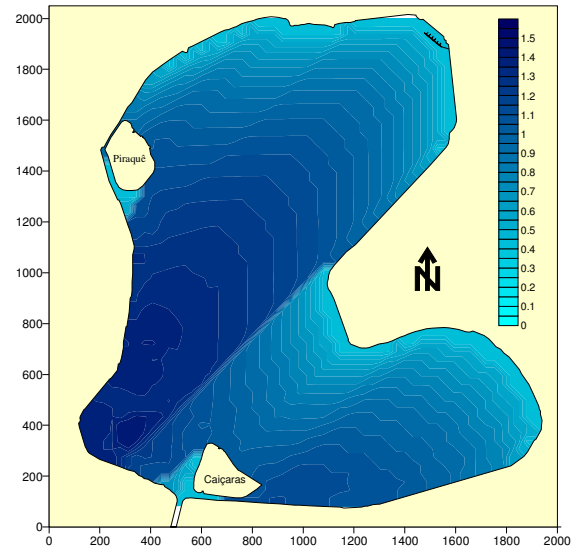


Altura significativa de onda para vento a 180° e intensidade de 10 m/s

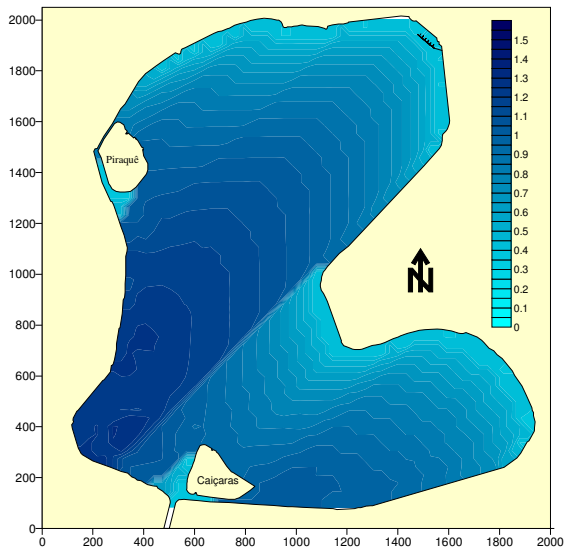
Figura 6.5. Alturas significativas de onda para vento a 180° em metros



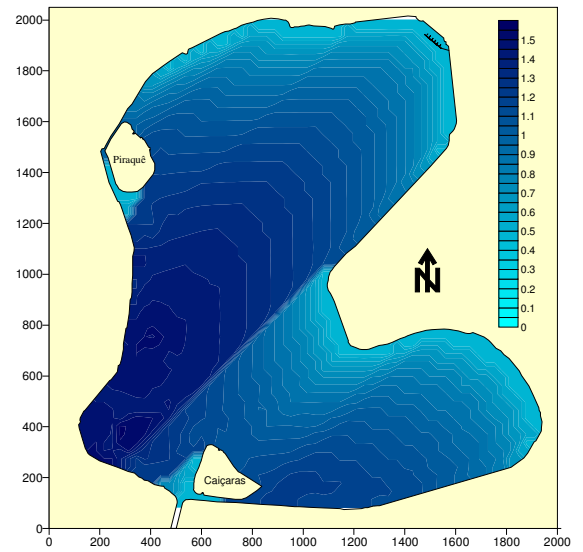
Período significativo de onda para vento a 45° e intensidade de 4 m/s



Período significativo de onda para vento a 45° e intensidade de 8 m/s

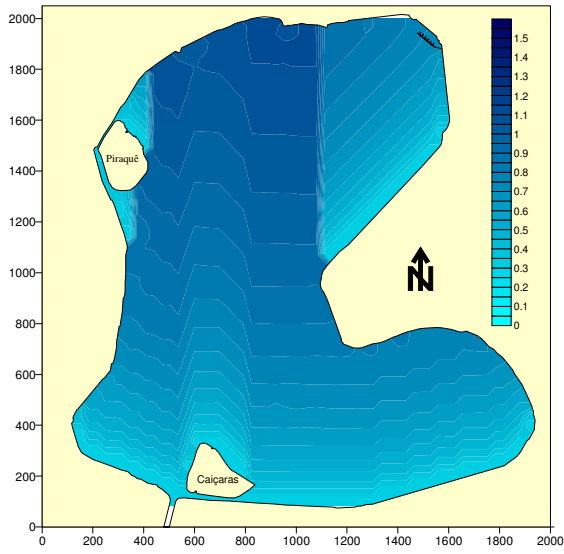


Período significativo de onda para vento a 45° e intensidade de 6 m/s

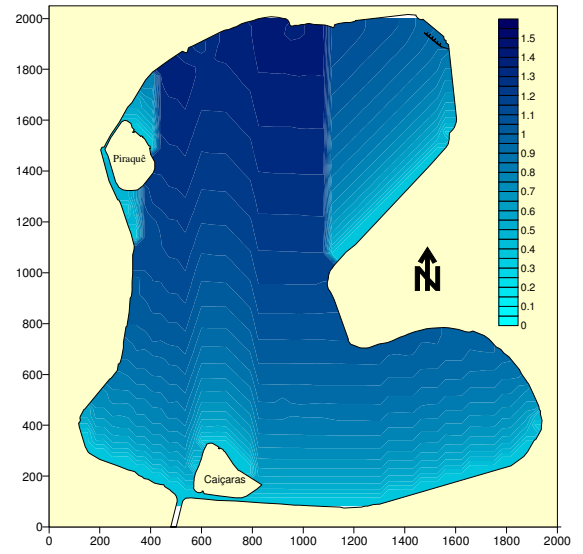


Período significativo de onda para vento a 45° e intensidade de 10 m/s

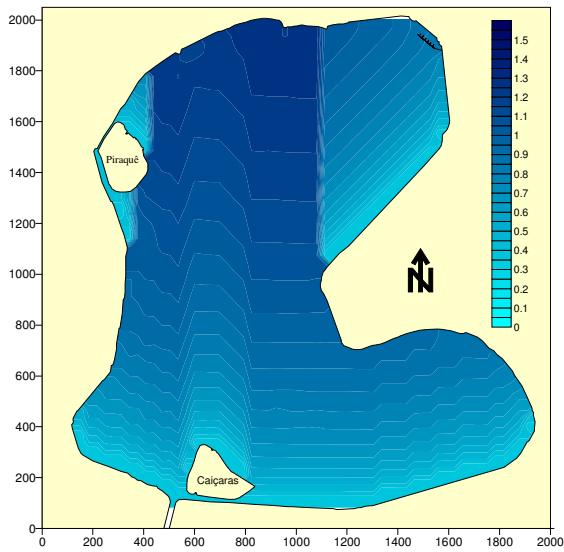
Figura 6.6. Períodos significativos de onda para vento a 45°



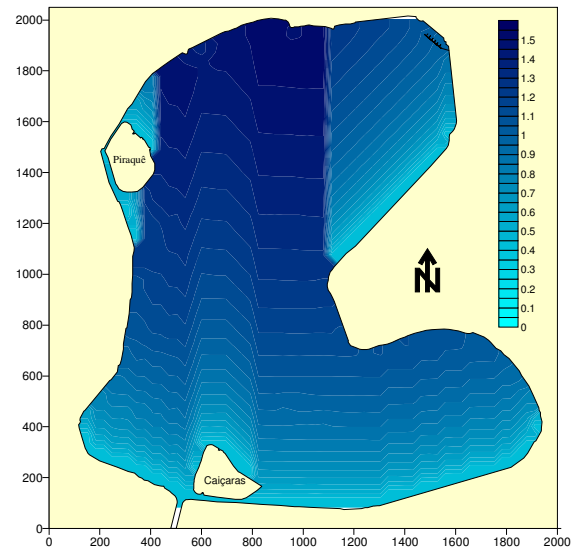
Período significativo de onda para vento a 180° e intensidade de 4 m/s



Período significativo de onda para vento a 180° e intensidade de 8 m/s

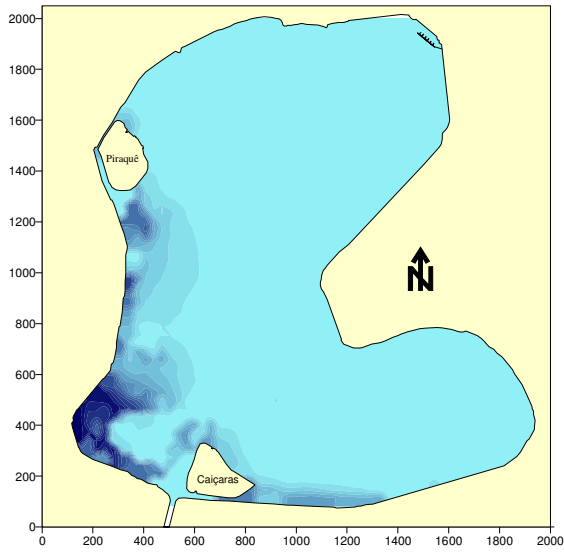


Período significativo de onda para vento a 180° e intensidade de 6 m/s

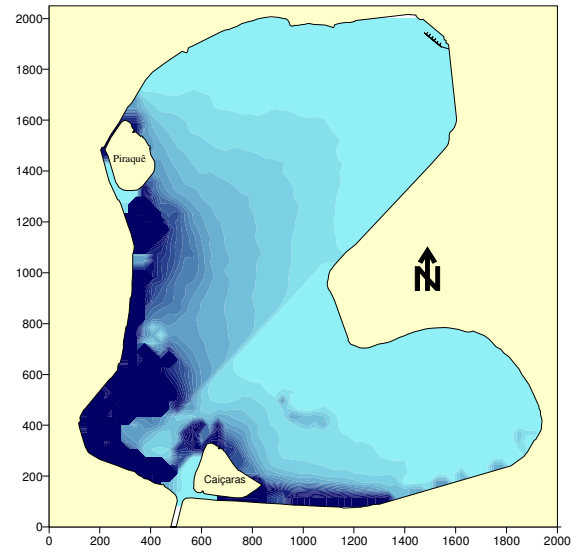


Período significativo de onda para vento a 180° e intensidade de 10 m/s

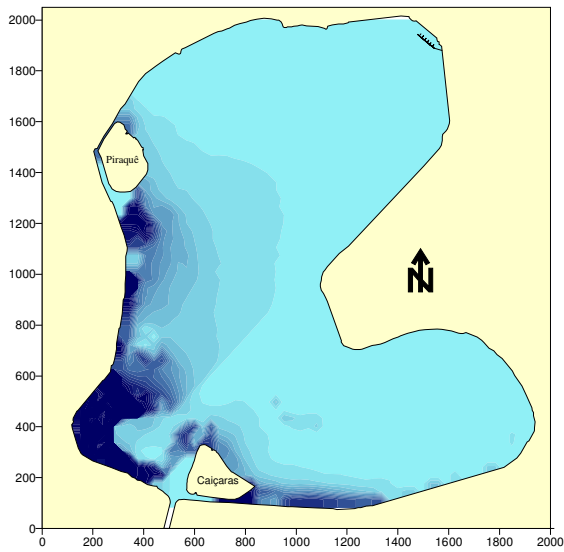
Figura 6.7. Períodos significativos de onda para vento a 180°



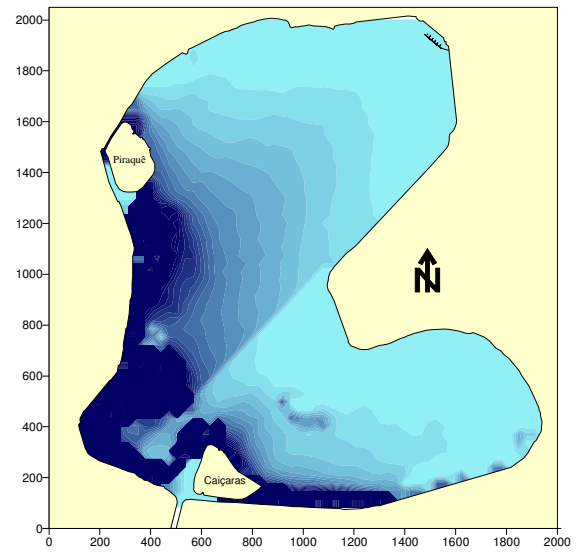
Tensões de cisalhamento com vento a 45° e intensidade de 4 m/s



Tensões de cisalhamento com vento a 45° e intensidade de 8 m/s

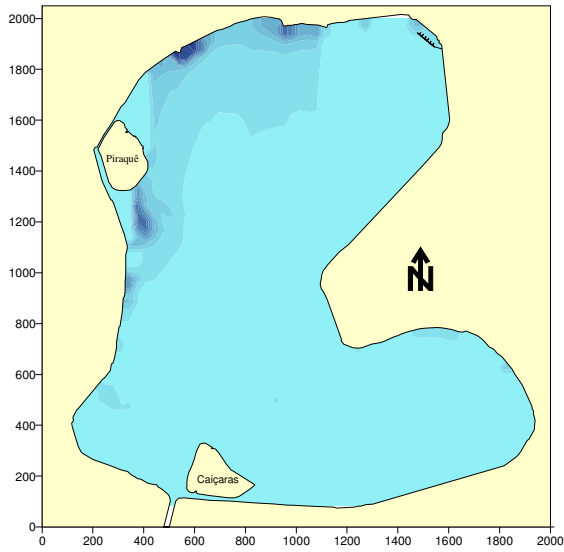


Tensões de cisalhamento com vento a 45° e intensidade de 6 m/s

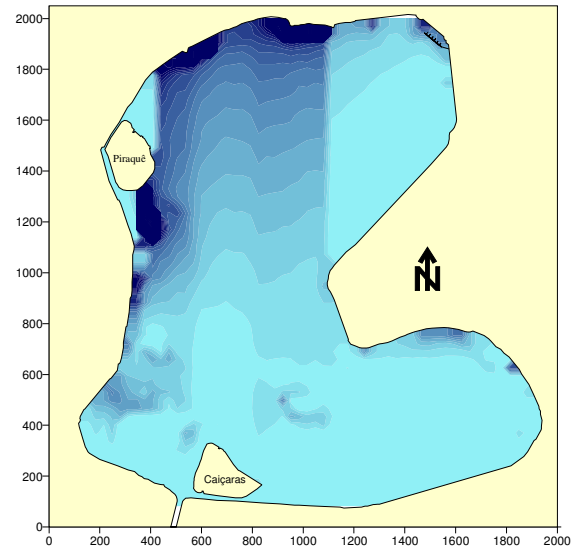


Tensões de cisalhamento com vento a 45° e intensidade de 10 m/s

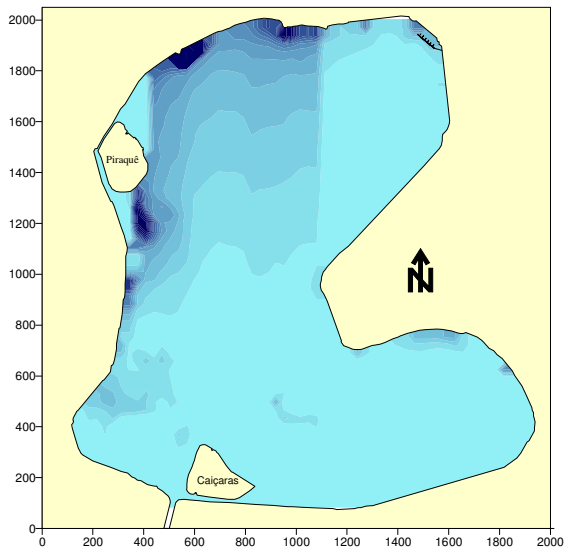
Figura 6.8. Tensões de cisalhamento para vento a 45°



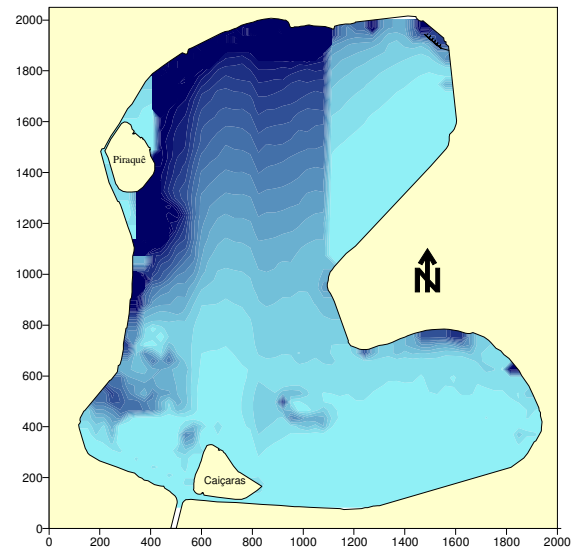
Tensões de cisalhamento com vento a 180° e intensidade de 4 m/s



Tensões de cisalhamento com vento a 180° e intensidade de 8 m/s

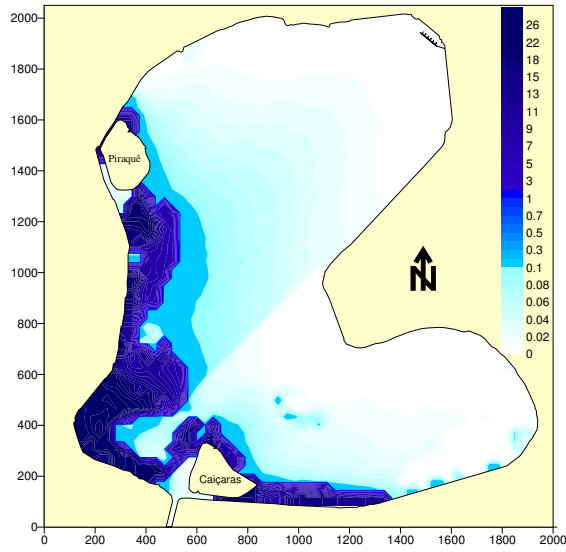


Tensões de cisalhamento com vento a 180° e intensidade de 6 m/s

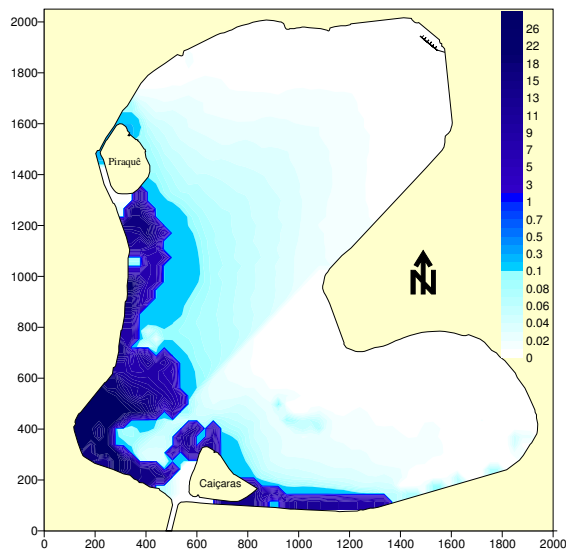


Tensões de cisalhamento com vento a 180° e intensidade de 10 m/s

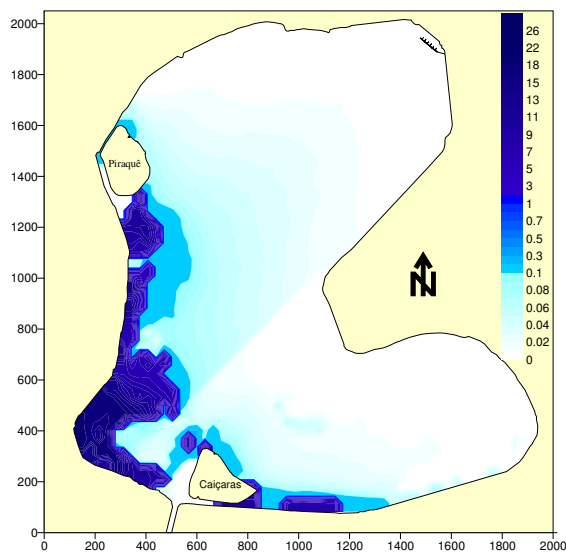
Figura 6.9. Tensões de cisalhamento para vento a 180°



Tensões de cisalhamento com vento a 45° , intensidade de 10 m/s e nível d'água 0,30 m abaixo do atual.

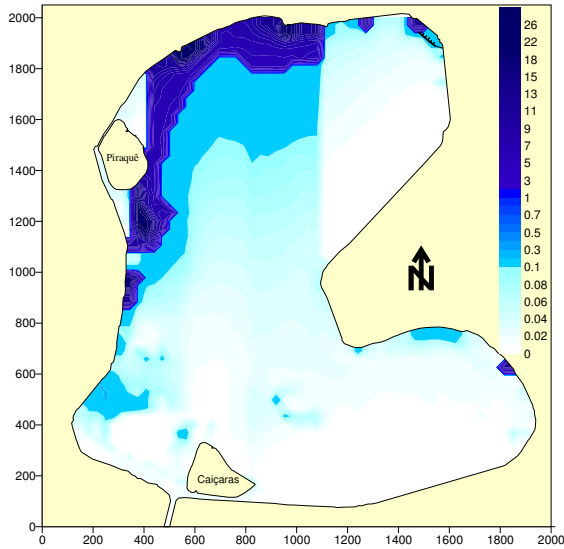


Tensões de cisalhamento com vento a 180° , intensidade de 10 m/s e nível d'água atual.

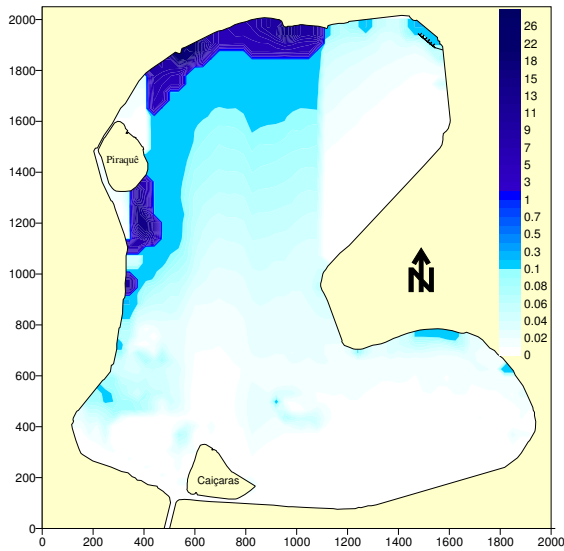


Tensões de cisalhamento com vento a 180° , intensidade de 10 m/s e nível d'água 0,30 m acima do atual.

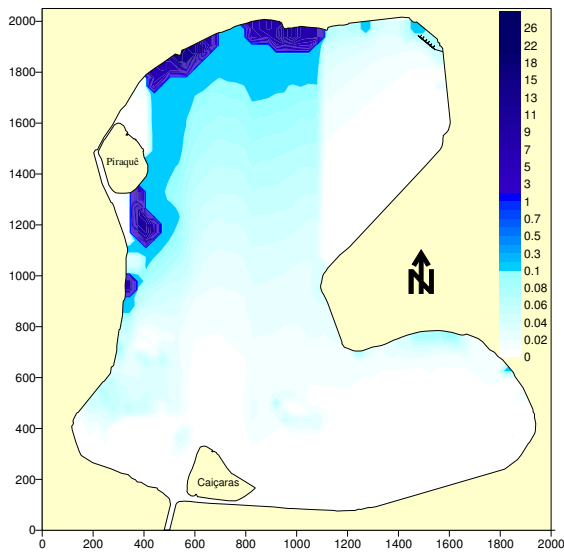
Figura 6.10. Tensões de cisalhamento para vento a 45°, intensidade de 10 m/s e com variação do nível d'água



Tensões de cisalhamento com vento a 180°, intensidade de 10 m/s e nível d'água 0,30 m abaixo do atual.



Tensões de cisalhamento com vento a 180°, intensidade de 10 m/s e nível d'água atual.



Tensões de cisalhamento com vento a 180°, intensidade de 10 m/s e nível d'água 0,30 m acima do atual.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A modelagem matemática permitiu a compreensão de fenômenos intervenientes no ecossistema e promoveu a transformação destes fenômenos em informação útil para o monitoramento do mesmo. Os dados obtidos na modelagem podem servir de base em futuras pesquisas sobre o transporte, sedimentação e ressuspensão de sedimentos.

O estudo realizado mostra que são necessárias medições de campo para que sejam obtidos resultados mais precisos e confiáveis que permitam a simulação, não só proposta por este trabalho, mas também por outros que integram o estudo da área de interesse em questão e que muito ainda deve ser pesquisado a respeito dos sedimentos e da qualidade de água na Lagoa Rodrigo de Freitas para que se possa planejar medidas que promovam a recuperação do ecossistema lagunar, o controle da qualidade da água e o seu uso racional, uma vez que os sistemas ambientais devem estar em consonância com os sistemas sócio-econômicos no sentido de garantir a sustentabilidade do ecossistema eminentemente urbano. Medições para determinação da densidade da água, viscosidade cinemática, rugosidade do fundo e principalmente velocidade do vento, possibilitariam a obtenção de resultados ainda mais satisfatórios.

Este estudo possibilita futuras investigações sobre a dinâmica dos contaminantes originados da ressuspensão do lodo e da drenagem da bacia e pode auxiliar em estudos futuros de modelagem dos parâmetros de qualidade de água servindo também de auxílio ao Gerenciamento Integrado em Bacias Hidrográficas Costeiras e para a compreensão dos ecossistemas das demais lagunas costeiras ao longo de todo território brasileiro.

Alguns princípios básicos de ecologia, tais como interdependência, reciclagem, parceria, flexibilidade, diversidade e, como conseqüência de todos estes, a sustentabilidade, devem ser compreendidos. A sobrevivência da humanidade dependerá de nossa alfabetização ecológica, da nossa capacidade para entender esses princípios da ecologia e viver em conformidade com eles.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEN, P.A.; COLLINSON J.D. *Lakes*. Ed. Sedimentary Environments and Faces. 2ª ed. 1986. 63-94p.
2. AMADOR, E.S. *Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza*. Rio de Janeiro: Edição do Autor. 1997.
3. AMBIENTAL, ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA. *EIA/RIMA Solução Integrada de Reabilitação Ambiental da LRF e das Praias de Ipanema, Leblon e Arpoador*. 2002.
4. BOFF, L. *A águia e a galinha: Uma metáfora da condição humana*. Petrópolis: Vozes. 38ª ed. 1997. 206 p.
5. BRAGA, B. et al. *Introdução à Engenharia Ambiental*. São Paulo: Prentice Hall. 2002. 305 p.
6. CERC. *Shore Manual Protection*, v.1, U.S. Army Corps of Engineers: Washington D.C., 1975
7. CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução CONAMA nº 20/86*, Brasília, 1986.
8. ESTEVES, F. A. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência. 2ª ed. 1998. 602 p.
9. FEEMA, Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. *Diretriz DZ 115/79*, Rio de Janeiro, 1979.
10. IBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico – Características da população e dos domicílios – Resultado do Universo 2000*.
11. IBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*, 2000.
12. MARTINS, R.P. *Desenvolvimento de um modelo numérico de circulação tridimensional para corpos d'água naturais com densidade variável*. Tese de Doutorado submetida à coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da UFRJ. 1999.
13. MUEHE, D. Geomorfologia Costeira. In: *Geomorfologia: uma Atualização de Bases e Conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1995.
14. MUEHE, D.; CORRÊA, C.H.T. *Dinâmica de Praia e Transporte de Sedimentos na Restinga de Maçambaba, RJ*. Rio de Janeiro. Rev. Brasil Geociências. 1989. 387-392p.
15. ODUM, E.P. *Ecologia*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara. 1988. 434 p.
16. OTSUBO, K.; MURAOKA, K. *Critical Shear Stress of Cohesive Bottom Sediments*, Journal of Hydraulic Engineering, v.114, nº 10. 1988.
17. OTSUBO, K.; MURAOKA, K. *Resuspension of Cohesive Sediments by Currents*. Third International Symposium on River Sedimentation – The University of Mississippi, 1986.
18. TORRES, J. M. *Contribuições da geologia para o diagnóstico da mortandade de peixes na Lagoa Rodrigo de Freitas*. Rio de Janeiro. s.ed. 1974. 14p.il.

19. VLAG, D. P. *A model for predicting waves and suspend silt concentration in a shallow lake*. Hydrobiologia 235/236, Belgium, 1992, 119-131p.
20. ZEE, D. *Entendendo o drama da Lagoa Rodrigo de Freitas*. Revista ECO 21, nº 64. Rio de Janeiro. 2002. 40-44p.