

RELATÓRIO DE PESQUISA:

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA LAGUNA DE ARARUAMA, PARA SUBSÍDIAR UM PROGRAMA DE RECUPERAÇÃO E GESTÃO.

- ? Julio Cesar Wasserman (coordenador)
- ? Albano Ribeiro Alves (modelização)
- ? Ana Maria Kosawa da Costa (microbiologia)
- ? Maria Leonisa Sanchez Nuñez Retto (microbiologia)
- ? Luiz Firmino Martins Pereira (gestão ambiental)
- ? Sérgio Ricardo de Barros (gestão ambiental)

Fevereiro 2006

RELATÓRIO DE PESQUISA:

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA LAGUNA DE ARARUAMA, PARA SUBSIDIAR UM PROGRAMA DE RECUPERAÇÃO E GESTÃO.

Equipe:

- ? Julio Cesar Wasserman (coordenador): Professor Adjunto IV do PGCA/LAGEMAR - UFF. Doutor em Oceanologia pela Universidade de Bordeaux I (França), Pós-Doutor em Química Ambiental pela Universidade de Pau et des pays de l'Adour (França)
- ? Albano Ribeiro Alves (modelização): Professor de Oceanografia da DHN, Mestrando em Ciência Ambiental - UFF
- ? Ana Maria Kosawa da Costa (microbiologia): Microbiologista do Depto. de Biologia Marinha, Laboratório de Microbiologia Marinha, Instituto de Biologia - UFRJ. Especialista em Ciências Ambientais - UFRRJ, Mestranda em Ciência Ambiental – UFF.
- ? Maria Leonisa Sanchez Nuñez Retto (microbiologia): Microbiologista do Depto. de Biologia Marinha, Laboratório de Microbiologia Marinha, Instituto de Biologia - UFRJ. Especialista em Ciências Ambientais - UFRRJ.
- ? Luiz Firmino Martins Pereira (arquiteto) - Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (Araruama) - Secretário Executivo do Consórcio de Municípios Lagos/São João, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental - UFF
- ? Sérgio Ricardo de Barros (economista) - Consultor da Fundação de Estudos do Mar - FEMAR, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental - UFF.
- ? Flávia Carmem Amorim Mendes Franco de Sousa (aluna de graduação do Curso de Geografia da Universidade Federal Fluminense)

INTRODUÇÃO

O presente relatório apresenta os resultados de um estudo de ambiental na Lagoa de Araruama, Rio de Janeiro. A Lagoa de Araruama é classificada como laguna afogada (Kjerfve, 1989), sendo assim particularmente suscetível aos efeitos da ocupação antrópica. Devido a uma baixíssima taxa de renovação e à presença de águas hipersalinas, os efeitos da eutroficação cultural sobre a laguna podem ser irreversíveis. Logo após o término dos levantamentos realizados no escopo deste projeto, observou-se uma floração fitoplanctônica nunca vista na laguna, o que causou a coloração da água para marrom. A situação é extremamente atípica e perigosa pois, além de nunca ter ocorrido grandes florações, esta que ocorre agora é muito persistente, permanecendo desde maio de 2005. Alguns estudos preliminares indicam a presença de cistos de dinoflagelados, contudo, ninguém ainda conseguiu entender porque o processo está tão persistente.

Neste verão (fevereiro de 2006), pode-se afirmar que a região deve sofrer um impacto socioeconômico muito significativo pois os turistas que vinham à região em busca dos banhos nas águas transparentes e tranquilas da laguna, devem encontrar águas marrons.

Os resultados deste estudo podem permitir, em longo prazo, uma melhor avaliação do problema e a proposição de soluções melhor adaptadas. Os estudos já realizados na laguna, particularmente o do grupo da COPPE (2003) que construiu um modelo hidrodinâmico, tiveram uma deficiência muito significativa, que é o fato de trabalharem com estudos batimétricos antigos da laguna. Na verdade, não tem muito sentido construir um modelo hidrodinâmico de uma laguna cuja batimetria é pouco conhecida. Assim, nosso primeiro passo foi concentrar os esforços na atualização batimétrica da laguna.

Inicialmente, imaginamos que seria possível partir de planos batimétricos mais antigos, como o da CPRM de 1984 ou o da DHN, de 1977, e complementar as informações, através de levantamentos focalizados em áreas específicas. Não obstante, os resultados de evolução das profundidades com o tempo, mostraram que o sistema é extremamente dinâmico e variações muito significativas na profundidade foram identificadas, nos levando a empreender o duro trabalho de levantar a batimetria completa da laguna.

Embora o montante de recursos liberado pela FAPERJ tenha sido muito inferior ao solicitado (R\$ 14.400,00 para uma demanda inicial de R\$ 25.000,00), fomos levados a realizar uma série de improvisos para poder produzir uma batimetria com um mínimo de qualidade e finalmente gerar os produtos apresentados neste relatório. O apoio do Consórcio Intermunicipal Lagos São João, que já estava implícito na participação do Ms.C. Luiz Firmino Martins Pereira, Secretário Geral da entidade, foi crucial para a geração dos produtos ora apresentados. Além de pagar o combustível de muitos dos trabalhos de campo realizados, o CILSJ também emprestou a embarcação e sua carreta rodoviária, utilizados neste trabalho. Emprestou ainda o ecobatímetro, um aparelho de GPS. Contamos ainda com o apoio da ONG Organização Ambiental para o Desenvolvimento Sustentável, na pessoa do Sr. Michael Völcker e seus filhos Jean e Stephan, que muito auxiliaram no trabalho de campo. Contamos ainda com o valioso apoio do Sr. Arnaldo Vila Nova da ONG Viva Lagoa que disponibilizou espaço em seu condomínio Casamares para a guarda do barco durante parte do trabalho.

O estudo ora apresentado, constitui-se numa valiosa contribuição para o processo de gestão da laguna. Mesmo antes de ser publicado, o estudo já foi utilizado pela Companhia de Furnas, que planeja a instalação de um campo de geração de energia eólica na restinga de Massambaba e estará utilizando o nosso estudo batimétrico para projetar a passagem de cabos submarinos de transmissão de energia.

OBJETIVOS ALCANÇADOS

Inicialmente, o estudo estabeleceu como objetivos a realização de experimentos de simulação do comportamento de poluentes conservativos e não conservativos nas águas da Lagoa de Araruama, visando a determinar a melhor localização de estações de depuração de esgotos. Os modelos hidrodinâmicos propostos foram o Aquasea (bidimensional) e o ECoS3 (unidimensional). Contudo, verificou-se que o modelo Aquasea daria uma resposta muito mais precisa e confiável dos processos hidrodinâmicos da laguna e assim o modelo ECoS3 acabou sendo abandonado.

Foram feitos ainda experimentos para a determinação do $T_{90\%}$ de coliformes, a partir de amostras de águas contaminadas da região. O modelo numérico bi-dimensional (Aquasea) foi construído a partir de um levantamento batimétrico completo da laguna. É importante sublinhar que este levantamento batimétrico não havia sido proposto inicialmente, mas acabou tendo que ser realizado pois verificou-se que a batimetria da laguna datada de 1984 não era adequada para representar os processos hidrodinâmicos atuais. Para justificar a realização da batimetria completa da laguna, foi realizado também um estudo completo da evolução batimétrica da laguna desde 1977.

Nem todos os objetivos propostos inicialmente puderam ser atingidos com os recursos disponíveis, especificamente aqueles relacionados à modelagem hidrodinâmica, como o modelo de transporte de poluentes, a distribuição do tempo de residência e as melhores posições para lançamento de efluente. Não obstante, foram realizadas muitas simulações de altura da laguna e velocidade das correntes (gerando 192 saídas), que deram uma boa idéia do comportamento hidrodinâmico da laguna e de suas trocas com o oceano.

Um projeto aprovado pelo Comitê da Bacia Lagos São João está esperando a liberação de recursos da SERLA para a realização de estudos mais aprofundados. Esta ferramenta de

modelagem e seus resultados serão disponibilizados para o Consórcio Intermunicipal Lagos São João e para o Comitê de Bacia da região.

METODOLOGIAS APLICADAS

O estudo contou com diversas etapas que serviram de base para o desenvolvimento do modelo bi-dimensional da hidrodinâmica (Aquasea) e que em uma segunda etapa vão permitir a obtenção de informações sobre a dispersão/degradação de poluentes e determinações dos tempos de residências nas diversas regiões da laguna.

1. Digitalização da Batimetria da laguna (1977 e 1984):

Foram digitalizados dois mapas batimétricos: o primeiro foi executado a partir de folhas de bordo nº B-1500 2/77 e B1500 1/77, realizadas pela Marinha do Brasil em 1977. O contorno da laguna foi digitalizado a partir de mapa do IBGE, folhas M12747/1/2/3/4, de 1975, e atualizada pela Fundação CIDE a partir de imagem satélite de 22/07/1994. Este contorno, que está em uma escala de 1:60000 foi o mesmo utilizado para todos os mapas batimétricos, inclusive o de 2005.

O segundo mapa batimétrico foi digitalizado a partir de levantamento batimétrico realizado pelo Departamento de Geologia da Companhia de Pesquisa de Recursos Naturais (CPRM) em 1984 a pedido da Companhia Álcalis. Embora o mapa tenha sido realizado com bastante cuidado, um grande trecho a Oeste deixou de ser feito e aparece em branco no nosso mapa.

Todas as digitalizações foram executadas no programa Surfer, versão 7. Os mapas originais (folhas de bordo da DHN e do CPRM) foram escaneados em equipamento de formato A0, gerando as imagens ilustradas nas figuras 1, 2 e 3. As imagens apresentadas não têm definição adequada pois estão consideravelmente reduzidas para poder caber neste relatório.

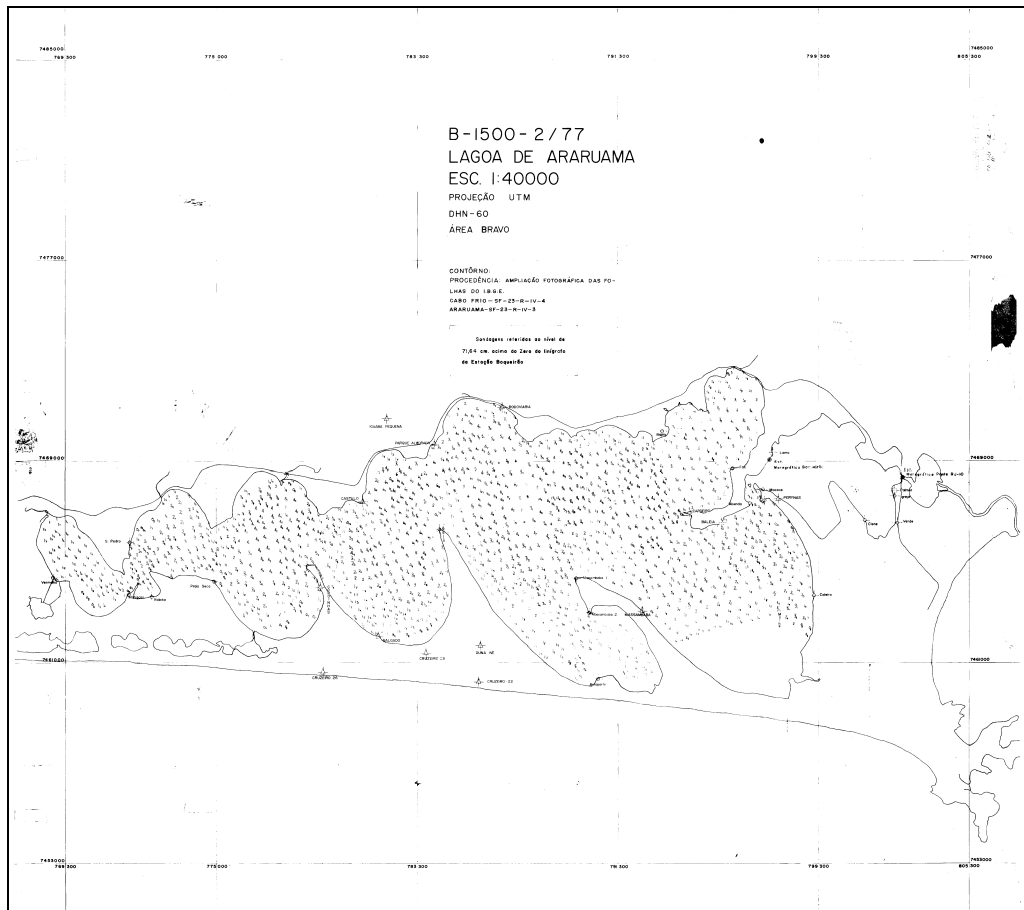




Figura 2: Folha de bordo DHN detalhe da laguna de Araruama

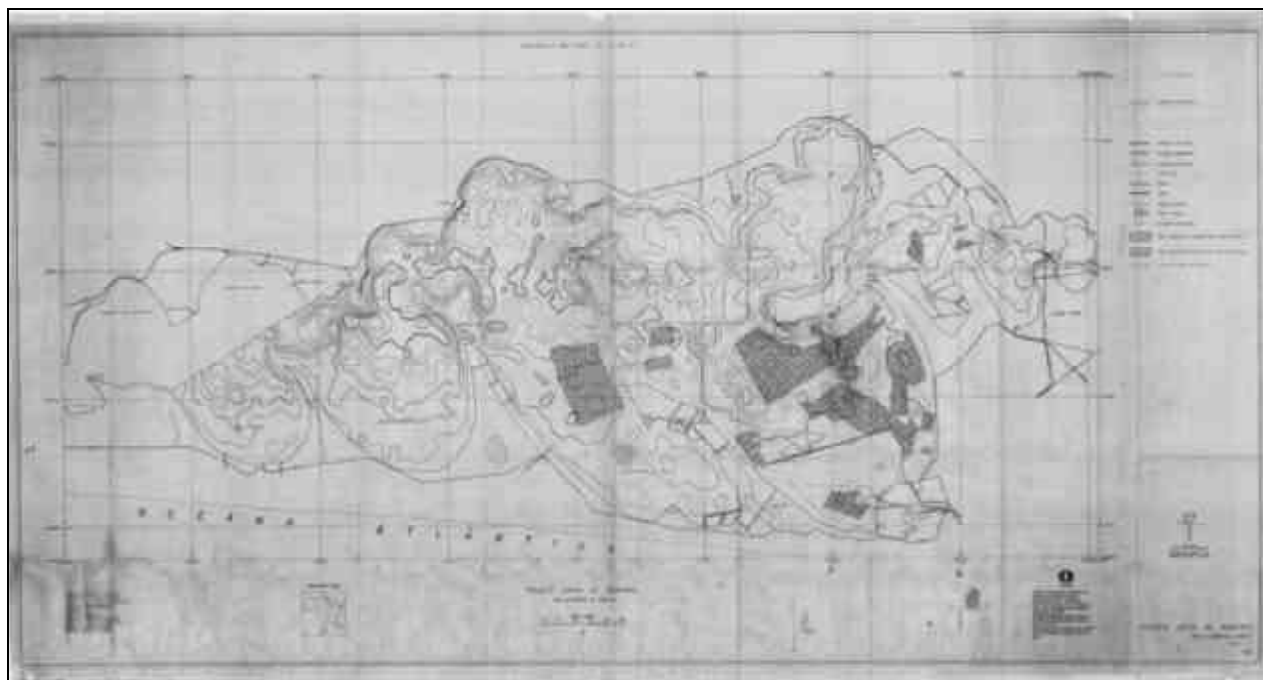


Figura 3: Mapa batimétrico realizado pela CPRM em 1984

As imagens apresentadas nas figuras 1, 2 e 3 foram inseridas como base map no programa Surfer e foram georeferenciadas. A projeção utilizada para todos os mapas foi UTM

e o datum utilizado foi Córrego Alegre. Quando os mapas estavam em um datum diferente ou com uma projeção diferente, os valores foram convertidos com o programa Geographic Translator, versão 2.2.5 (versão gratuita, disponível na Internet). Com o georeferenciamento dos mapas, foi então possível digitalizar as profundidades de cada um dos mapas. O contorno da laguna foi também digitalizado e inserido como um base map que serve de máscara para as extrapolações espúrias do programa. Aos pontos digitalizados da margem foi atribuído valor zero de profundidade a fim de forçar o processo de interpolação a atingir valor zero nas margens.

A partir dos dados digitalizados, foi gerado um grid de aproximadamente 10 mil pontos (100 x 100) e os contornos foram gerados pelo método da triangulação com interpolação linear. O programa Surfer oferece várias opções para interpolação, dentre as quais a mais utilizada é a krigagem. Contudo, devido à quantidade de dados, preferimos utilizar a interpolação linear que gera curvas menos arredondadas e quebras mais bruscas, mas também não cria artefatos matemáticos. Considerando a densidade de dados, esta foi a melhor opção.

2. Batimetria Atual da Laguna (2005):

A batimetria foi planejada inicialmente com uma malha de aproximadamente 250 metros – distanciamento entre transversais de 250 metros e medidas nas transversais a cada 250 metros. Acreditamos que este distanciamento poderia permitir a construção de um mapa em escala de 1:50.000. Contudo, em alguns pontos o distanciamento foi menor, o que nos levou a estabelecer uma escala 1:35.467. O planejamento da batimetria aparece representado na figura 4.

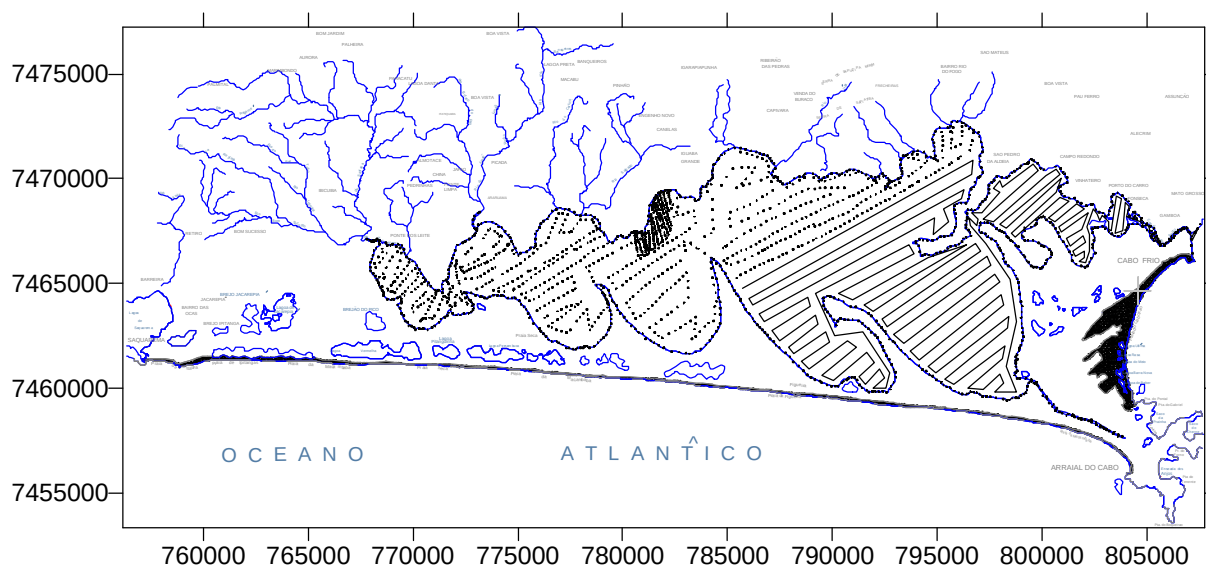


Figura 4: Planejamento do levantamento batimétrico.

A batimetria foi realizada com os seguintes equipamentos:

1. Barco inflável com motor de 25 HPs (propriedade do CILSJ), apresentado na figura 5.
2. Ecobatímetro Piranha II (Humminbird). Funciona com uma bateria de 12 Volts (no caso foi adquirida uma bateria de motocicleta, com um carregador) e o sonar emite um sinal a uma frequência de 200 kHz. O equipamento não permitiu a sondagem contínua durante o percurso pois a turbulência influencia muito a medida. A cada ponto de medida foi necessário parar o barco para fazer a medida, o que aumentou muito o consumo de combustível durante todo o levantamento. O equipamento também não conta com memória

de profundidades (datalogger) o que nos levou a registrar as profundidades em caderneta de campo.



Figura 5: barco equipado com motor de 25 HP e equipamentos utilizados no levantamento batimétrico

3. Aparelho de GPS Garmin 12 dedicado à navegação. As coordenadas dos vértices das transversais apresentadas na figura 4 foram inseridas na memória do GPS, graças ao cabo de conexão GPS-PC, adquirido com recursos do projeto e ao programa GPS-Trackmaker. A navegação foi toda realizada com a função go-to do GPS.
4. Aparelho de GPS Garmin E-trex (pertencente ao CILSJ), no qual foram registrados os pontos batimétricos. Todo o levantamento batimétrico foi baixado no computador através de cabo de conexão e com o programa GPS-Trackmaker. O arquivo gerado é txt, mas pode ser facilmente exportado para o formato Excel, que é então lido pelo programa Surfer 7. Os pontos do levantamento da laguna são apresentados na figura 6 e os pontos do canal são apresentados na figura 7. Foram levantados um total de 1461 pontos em toda a laguna, perfazendo um total de quase 500 km de batimetria.

A batimetria do canal foi um pouco mais detalhada do que a da laguna. A base do IBGE apresentava imprecisões grandes (da ordem de 100 metros) na área do canal e assim foi feito

um estudo para reposicionar as margens do canal. Foram tirados vários pontos na margem com o GPS, a fim de se determinar o verdadeiro contorno da margem. Todas as medidas também foram reduzidas para o datum vertical de Imbituba. Para isto foram identificadas algumas referências de nível ao longo da margem da laguna. Particularmente útil, foram as referências na sede da UFF em Iguaba Grande, onde a SERLA inclusive já instalou uma régua limnimétrica, cujos valores são diariamente anotados pelo responsável da sede. Outra referência importante está situada no centro de Cabo Frio, que nos permitiu construir uma régua no Canal de Itajurú.

Os três levantamentos batimétricos permitiram a construção dos mapas apresentados como produtos deste estudo. Além disto o programa Surfer permite construir mapas de diferença de profundidade de um levantamento para o outro, representando assim a distribuição das taxas de sedimentação e erosão. Assim foram construídos mapas das identificando a sedimentação/erosão entre 1977 e 1984 e 1977 e 2005.

3. $T_{90\%}$ das bactérias em águas salgadas

Para determinar o $T_{90\%}$ das bactérias do grupo coliforme, aplicável à região, foram realizados bioensaios utilizando a água da lagoa (estéril), com salinidades de 0 a 69. A água foi coletada em uma das campanhas de amostragem em 3 galões de 20 L. As amostras de água foram trazidas para o laboratório, esterilizadas em autoclave e deixadas para envelhecer no escuro por 20 dias. No dia do início dos experimentos, foi coletada amostra de esgoto do Rio Mataruna, em Araruama. A amostra foi coletada alguns metros antes da entrada da estação de tratamento de esgotos de Araruama. É interessante notar que no momento da coleta, a estação estava inoperante e o esgoto na verdade estava sendo lançado in natura na laguna.

No laboratório o experimento foi elaborado em dois grupos, um grupo de controle onde 200 mL de efluente foram inoculados em um Becher de 2000 mL, completado com água destilada e esterilizada (1800 mL). No experimento, foi utilizado um Becher de 2000 mL, onde foram colocados 1800 mL de água da laguna de Araruama, com salinidade de 69 e mais 200 mL de efluente.

Para cada um dos experimentos, Foram retiradas alíquotas para serem inoculadas em meio de cultura Caldo Lauril Sulfato, para determinação de coliformes totais, nos seguintes tempos: T0 horas, T2 hs, T4 hs, T6 hs, T8 hs, T10 hs, T24 hs, T48 hs, T72 hs, T96 h, T144 h, T192 hs, T240 hs, T288 hs, T336 hs, T384 hs, T432 hs, T480 hs, T528 hs, T576 hs, T624 hs, T672 hs, T720 hs. Os tubos positivos foram re-inoculados em meio de cultura Caldo EC, para determinação de coliformes termotolerantes

3. Modelagem

A modelagem hidrodinâmica em duas dimensões foi realizada utilizando o programa Aquasea (Islândia), que trabalha com equações aproximadas usando o método Garlekin em elementos finitos triangulares, utilizando as equações de continuidade, de momentum e de transporte. O programa possui interface gráfica muito potente, que permite a construção de mapas em coordenadas longitudinais e latitudinais de distribuição dos parâmetros.

O modelo foi construído com base nos dados batimétricos de 2005. O arquivo de batimetria gerado no programa Surfer 8 é exportado para o formato DXF, que é lido pelo Aquasea onde são plotados os nós do modelo. Dois modelos foram realizados, um com as fronteiras fechadas, onde unicamente incide o vento e outro com fronteira aberta (Canal de Itajurú) onde além do vento incidem também as marés. Foram construídas simulações

considerando, ventos de NE e SW de 5 e 8 nós incluindo situações de maré de sizígia, quadratura e sem maré (tabela 1). .

Tabela 1: resumo das simulações realizadas neste estudo.

	Vento 5 NE	Vento 5 SW	Vento 8 NE	Vento 8 SW	Maré Sizígia	Maré quadrat.
Vento 5 NE						
Vento 5 SW						
Vento 8 NE						
Vento 8 SW						
Maré Sizígia						
Maré quadrat.						
Sem vento						
Sem maré						

Para cada simulação foram geradas saídas de elevação da água da laguna e velocidade das correntes. As saídas são apresentadas no CD em anexo para 3 horas, 6 horas, 12 horas e 24 horas, sendo que para as simulações de velocidade, incluindo a maré, foram acrescentadas saídas para a hora 9 e para a hora 15. Foram realizadas no total, 192 saídas (arquivos out para elevação e dat para velocidade).

Os arquivos out e dat foram então exportados para o formato Surfer, onde foram construídos os mapas apresentados no CD em anexo.

RESULTADOS

1. Estudo Batimétrico da Laguna de Araruama

A digitalização dos dados de 1977 e 1984 permitiu a construção de mapas batimétricos de períodos consecutivos que puderam ser comparados com o estudo batimétrico que foi realizado em 2005. As figuras 8, 9 e 10 mostram os mapas batimétricos resultantes dos consecutivos levantamentos. A figura 11 apresenta ainda o detalhamento do canal de Itajurú, uma área que ainda não havia sido detalhada anteriormente

Estes mapas também estão sendo apresentados em grande formato no anexo deste relatório.

A comparação dos diferentes mapas permitiu a construção de mapas de sedimentação e erosão que estão apresentados nas figuras 12 (1977 – 1984) e 13 (1977 – 2005). Os mapas apresentam taxas de erosão e de sedimentação muito significativas em diversos pontos. Estes resultados parecem ser de difícil explicação se analisados do ponto de vista dos aportes continentais. Na verdade os aportes continentais de sedimentos para a laguna de Araruama são muito pequenos e muito provavelmente seriam incapazes de gerar valores de assoreamento tão elevados. Provavelmente os maiores aportes são antrópicos, oriundos da engorda das praias da margem norte da laguna, mas ainda assim, estes aportes não seriam capazes de provocar tão elevadas taxas. A explicação parece estar relacionada ao fato de a laguna estar constantemente mobilizando seus sedimentos através de correntes de vento. Parecem ocorrer perdas de sedimentos (áreas azuis) sobretudo nas margens da laguna, ao passo que a acumulação (áreas laranja) parece estar ocorrendo mais na parte central. É muito provável que tais processos estejam associados à hidrodinâmica da laguna, contudo o entendimento de tais processos demanda a construção de modelos hidrodinâmicos muito complexos. Atualmente o aluno de doutorado Albano Ribeiro Alves está desenvolvendo um modelo hidrodinâmico tridimensional, com o programa ECOM, que acoplado a um modelo

por nós desenvolvido, será capaz de reproduzir os processos sedimentares e erosivos no corpo inteiro da laguna, incluindo as margens.

Tabela 1: Estatísticas comparativas entre os 3 levantamentos batimétricos.

Parâmetro	1977	1984	2005
Número total de pontos digitalizados	1882	2902	1404
Profundidade máxima (m)	17,5	14,4	16,62
Profundidade média (m)	2,85	3,15	3,03
Desvio padrão (m)	2,11	2,27	2,31

2. $T_{90\%}$ das bactérias na laguna de Araruama

As figuras 14 e 15 mostram a variação da colimetria com o tempo para os experimentos de controle e com salinidade de 65. Pode-se observar que existe uma significativa queda nas concentrações dos coliformes, muito mais acentuada nas amostras submetidas à salinidade. Os resultados indicam que existe efetivamente um efeito da salinidade na mortalidade das bactérias que, contudo não é tão significativo como previsto inicialmente. Para uma água tão salgada como a da laguna de Araruama, esperava-se uma queda da população bacteriana para valores próximos a zero muito rapidamente.

Nos experimentos de controle as bactérias parecem manter uma produção constante ao longo das 720 horas. Alguns picos podem ser observados (384ª hora), que podem ser associados à maturidade na produção bacteriana, mas retornando rapidamente aos patamares anteriores. Nos experimentos com salinidade (figura 15), os picos de produção bacteriana voltam a aparecer e, pelas mesmas razões, são efêmeros, retornando rapidamente aos padrões normais. As representações logarítmicas representam muito bem o término da produção bacteriana a partir da hora 500, indicando um efeito da salinidade.

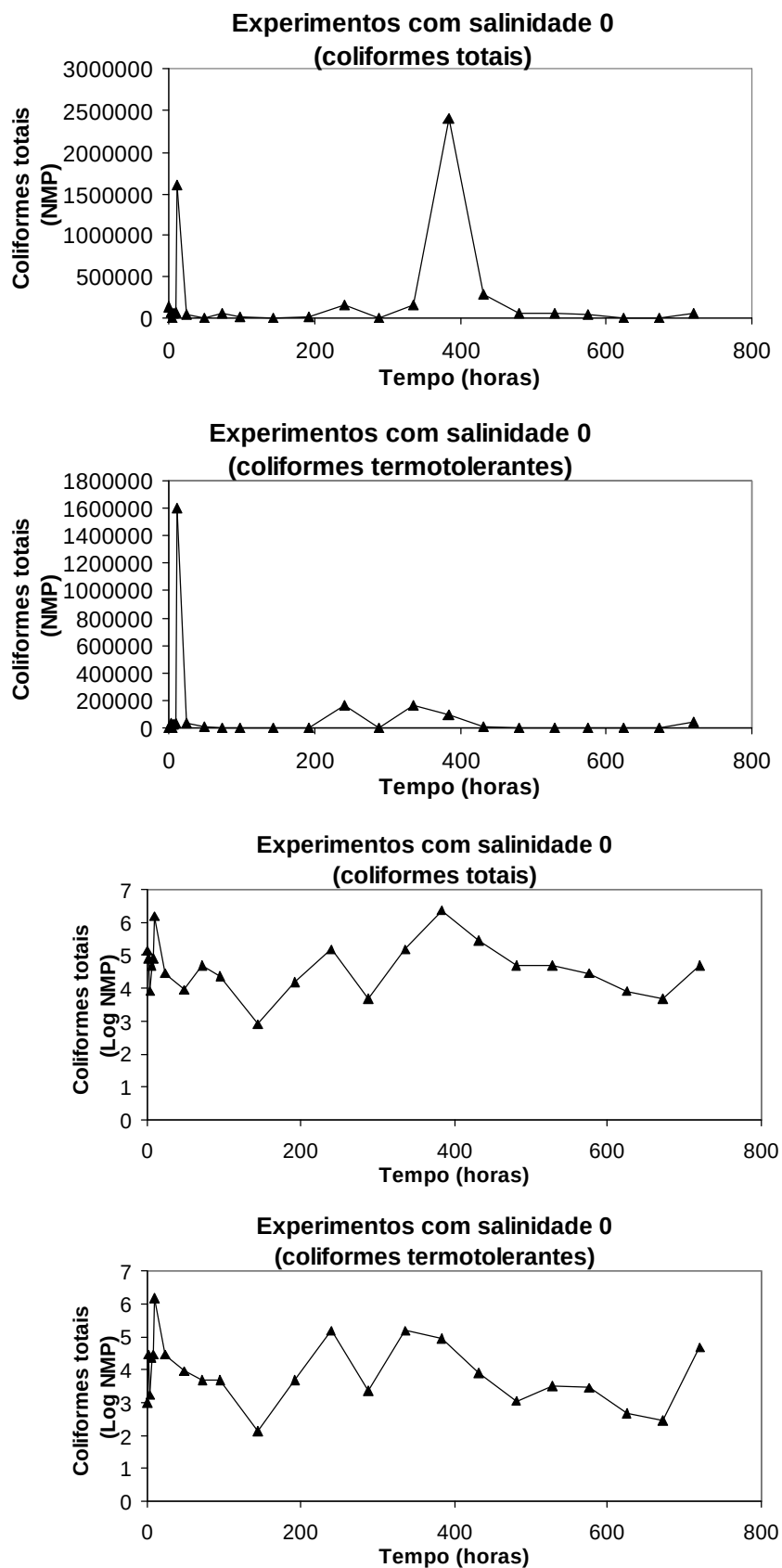


Figura 14: Resultados da variação da colimetria com o tempo para o experimento de controle (salinidade 0). Os dois últimos gráficos correspondem à representação da variação do Log da colimetria, o que permite uma melhor visualização da variação.

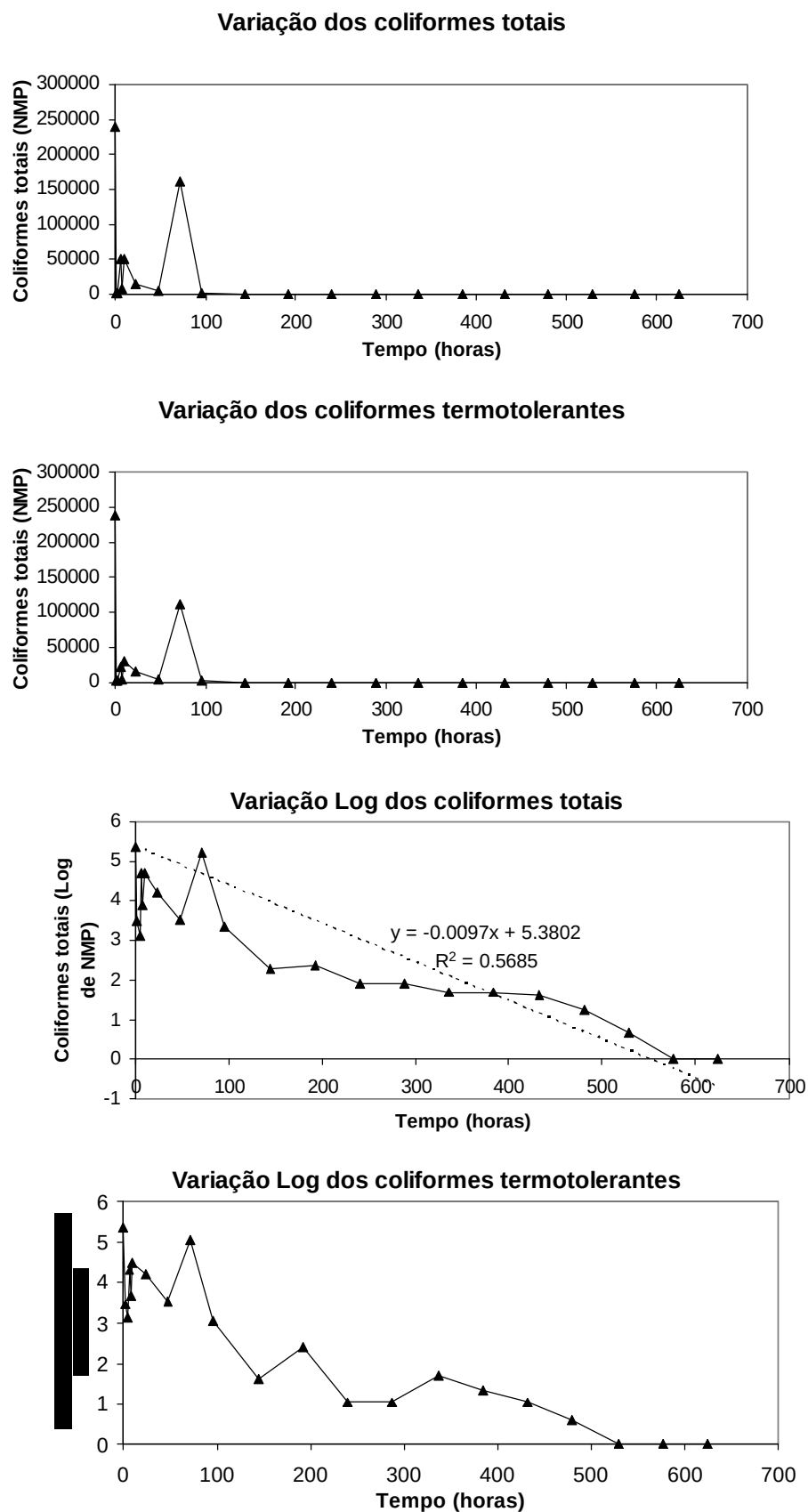


Figura 15: Resultados da variação da colimetria com o tempo para o experimento de salinidade 65. Os dois últimos gráficos correspondem à representação da variação do Log da colimetria, o que permite uma melhor visualização da variação.

A interpretação dos dois experimentos (Figuras 14 e 15) indica que o decaimento da atividade bacteriana é muito mais lento do que o previsto para este tipo de ambiente. Isto foi atribuído ao fato de, pela primeira vez na literatura termos trabalho com comunidades bacterianas indígenas, de maior capacidade de resistência. Os resultados parecem muito mais coerentes com o perfil da laguna de Araruama e as simulações que serão realizadas em estudos mais detalhados, com certeza estarão muito mais próximas da realidade.

O cálculo do $T_{90\%}$, com base nos dados ora apresentados foi feito através da construção de uma curva que melhor se ajustasse ao comportamento dos resultados, representada pela equação:

$$CT = \text{Log} (-0.0097 * T + 5.3802)$$

Sendo, CT o valor de coliformes totais (em NMP) e T é o tempo (em horas). A plotagem do valor de CT correspondente a 10% do valor inicial ($CT = 200$ NMP) nos leva a um $T_{90\%}$ de 103,09 horas.

É possível ainda estabelecer uma curva interpolada para um comportamento logarítmico de aumento da sobrevivência com a queda na salinidade, nos levando aos resultados apresentados na Tabela 2. A curva que serve de base para os resultados da Tabela 2 é representada na figura 16

Tabela 2: Variação do $T_{90\%}$ com a salinidade.

SAL	TEMPO (horas)
5	604.0838
10	521.3244
15	449.903
20	388.2663
25	335.0739
30	289.1688
35	249.5527
40	215.364
45	185.8591
50	160.3964
55	138.4221
60	119.4583
65	103.0925

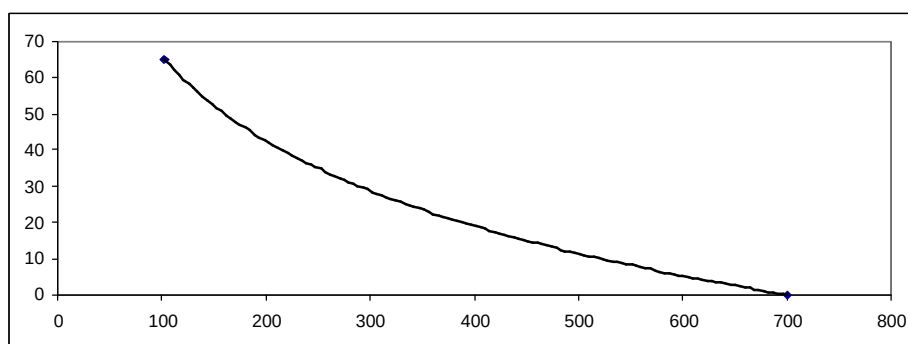


Figura 16 Curva mostrando a queda no $T_{90\%}$ (x) com a queda na salinidade (y)

Estes resultados poderão ser incluídos em modelos hidrodinâmicos de lagunas hipersalinas para permitir a previsão dos níveis de balneabilidade de cada área do sistema.

Embora estes ensaios não tenham sido realizados no nosso modelo, a execução de simulações de transporte permitiria este prognóstico.

2. Modelagem hidrodinâmica 2D da laguna de Araruama

Como explicado na parte metodológica, dois tipos de saídas foram executadas. A saída elevação mostra a distribuição da altura da água em qualquer ponto da laguna. A força dos ventos e das marés fazem o nível da laguna subir em determinados pontos, levando à formação de um desequilíbrio hidrostático. Este desequilíbrio é compensado pela formação de correntes e contra-correntes, mas sempre levando a desnível. Quando o vento para, o desnível é quebrado e lentamente a laguna se equilibra novamente. Os resultados obtidos, apresentados em anexo (CD-ROM), indicam que os ventos podem forçar desequilíbrios significativos ao longo da lagoa (até 8 cm). A figura 17 mostra um exemplo dos mapas de elevação, considerando apenas um vento de 8 nós de NE, por um período de 24 horas.

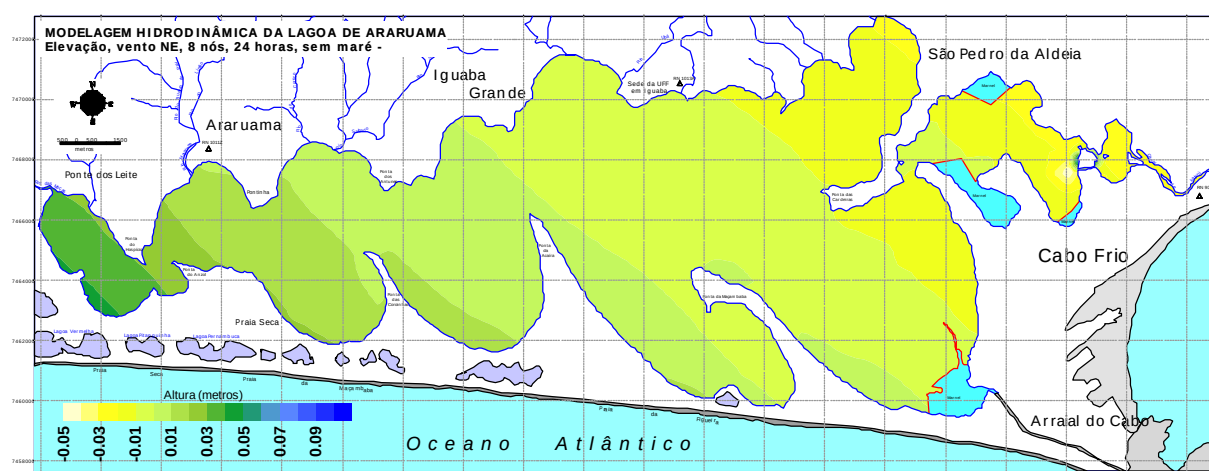


Figura 17: Simulação da elevação da laguna de Araruama, considerando apenas um vento de 8 nós de NE, por um período de 24 horas

Por outro lado, as marés também são capazes de gerar desequilíbrios ainda mais significativos, de mais de 50 cm (Figura 18). Contudo, os desníveis gerados pela maré parecem não se propagar de maneira significativa ao longo da laguna, ficando restritos ao Canal de Itajurú (Figura 19).

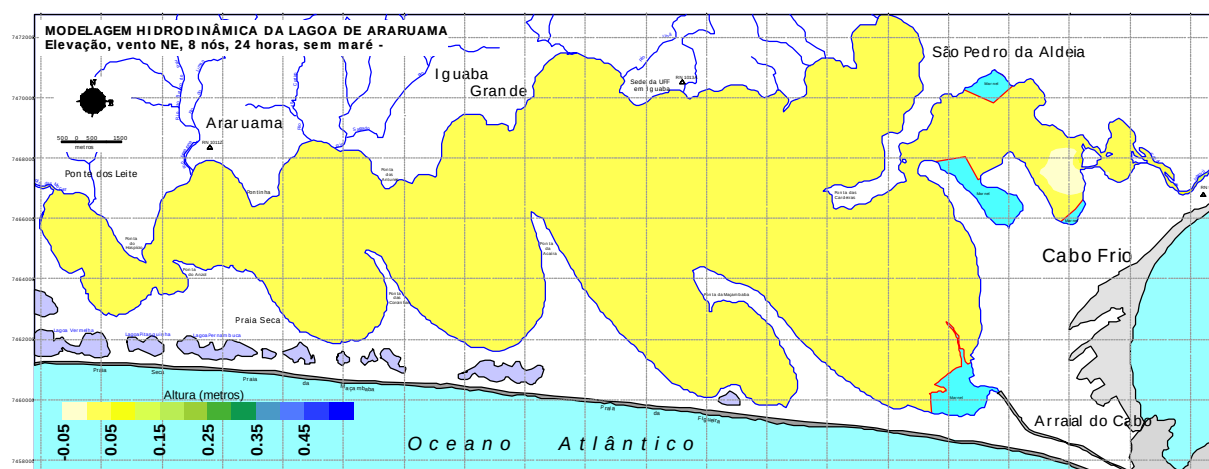


Figura 18: Simulação da elevação da laguna de Araruama, considerando apenas a maré de sizígia. A simulação corresponde à hora 6, maré alta.

A figura 18 mostra que ao longo da laguna, a oscilação de altura devida à maré é insignificante. Observa-se uma pequena oscilação na Enseada do Siqueira (próximo à saída do Canal de Itajurú).

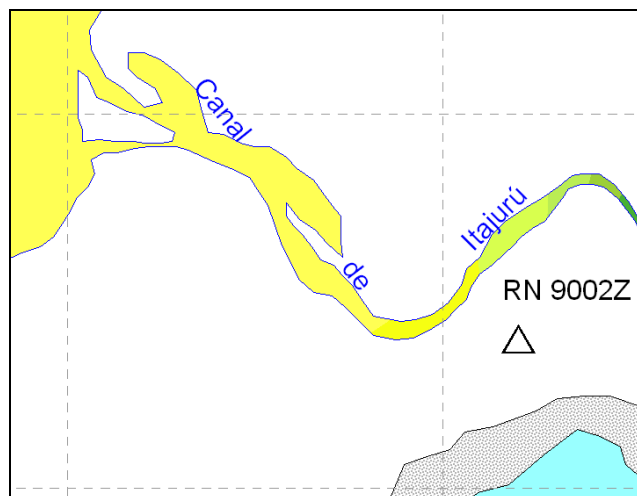


Figura 19: Detalhe ampliado da figura 18, mostrando como a variação na altura da água da laguna de Araruama está restrita ao Canal de Itajurú. Embora a figura não mostre a saída do canal com o mar, esta área também foi simulada e é a que apresenta maior variação.

A velocidade das correntes também parece responder de maneira significativa à forçante vento. Como visto anteriormente, no modelo, os ventos sopram de maneira contínua na direção simulada e vão lentamente empilhando a água nas margens da laguna. No início do processo (primeira hora) as correntes têm a mesma direção do vento, contudo, à medida que vai ocorrendo o empilhamento, correntes de retorno começam a aparecer e o sistema passa a funcionar com células de corrente. A figura 20 mostra como após um período de 3 horas o proce

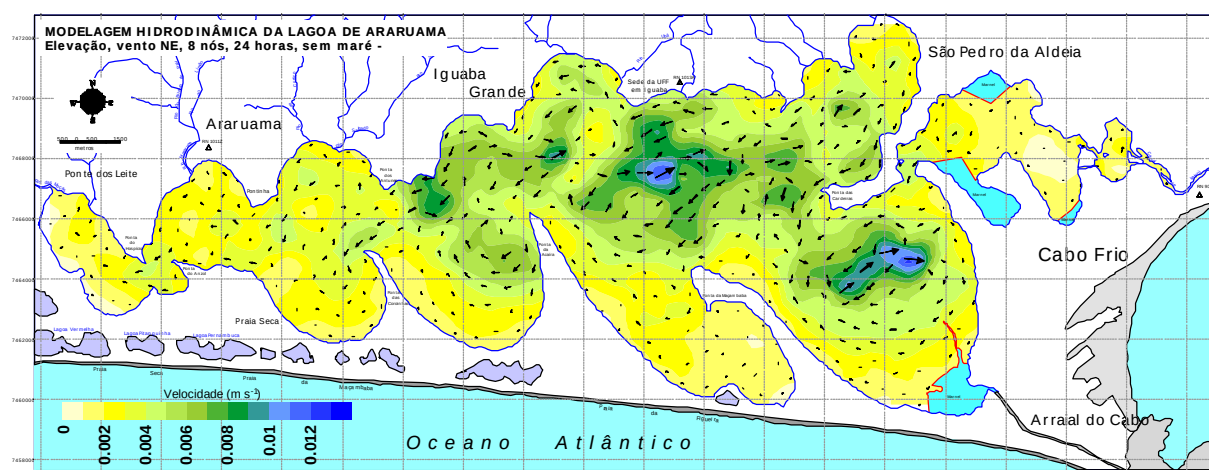


Figura 20: Simulação das velocidades das correntes na laguna de Araruama, considerando apenas um vento de 8 nós NE por 3 horas. Observa-se a formação das células de circulação.

As simulações considerando os efeitos da maré também denotam uma baixíssima influência desta forçante nos processos hidrodinâmicos da laguna (Figura 21). A maré forma uma forte corrente no canal de Itajurú, contudo ao atingir a enseada do Siqueira a corrente é rapidamente dispersa e passa a não influenciar mais as correntes da área (Figura 22).

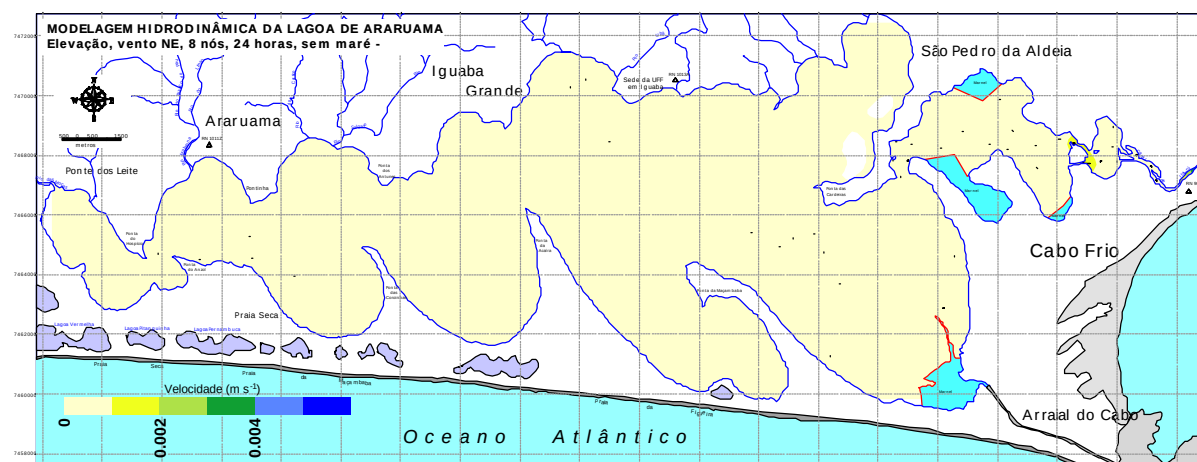


Figura 21: Simulação da influência das correntes de maré na laguna de Araruama.

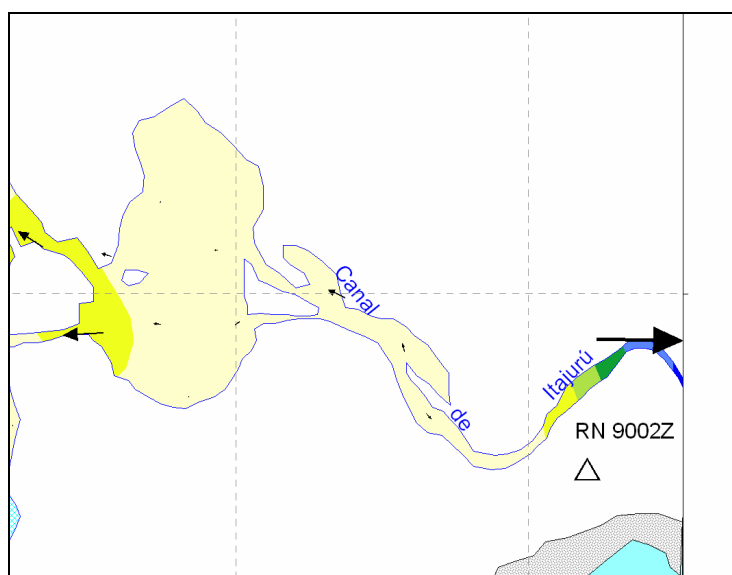


Figura 21: Simulação da influência das correntes de maré na laguna de Araruama. Detalhe das correntes no canal de Itajurú.

CONCLUSÕES

Um produto muito significativo resultante deste projeto foi a atualização da carta batimétrica de Araruama. Os documentos anteriores, datados de 1984 e de 1975 ainda estavam sendo utilizados para diversos fins, incluindo a navegação, modelagem hidrodinâmica, processos de gestão ambiental, etc. O mapa atualizado da batimetria já foi fornecido (gratuitamente) para a companhia Furnas, que tem projeto de uma central de geração de energia eólica na Restinga da Massambaba. O nosso documento servirá de suporte ao planejamento da colocação de cabos de energia submersos. O documento também já foi fornecido ao Professor Paulo César Colona Rosmann do Laboratório de Engenharia Naval e Oceânica (COPPE-UFRJ) para atualizar o seu modelo hidrodinâmico bidimensional da lagoa. O mapa foi também fornecido ao Consórcio Ambiental Lagos São João que utilizará como base para a gestão dos recursos naturais e turismo da região. Existe um compromisso por parte do CILSJ de publicar o documento, permitindo que este sirva para a navegação de lazer na lagoa.

É uma pena que os pouquíssimos recursos disponibilizados pela FAPERJ não tenham permitido a execução da batimetria segundo as exigências da Marinha do Brasil, o que geraria um trabalho mais detalhado e mais preciso e mais rápido.

A comparação entre as diferentes batimetrias também apresentou resultados importantes no tocante à sedimentologia da região. Ficou evidente que os movimentos de sedimento ao longo da laguna são muito significativos. Assim foi possível entender porque as milhares de toneladas de areia, lançadas anualmente nas praias da margem Norte da laguna, são sistematicamente remanejadas. Um estudo detalhado do comportamento do comportamento sedimentológico da laguna é urgente. Atualmente um aluno de doutorado está desenvolvendo modelo tridimensional para justamente abordar este problema. Infelizmente não dispomos de nenhum recurso para execução deste estudo.

Os dados de colimetria da laguna também constituem informação inédita e de mais alta importância. Experimentos de $T_{90\%}$ anteriores realizados com bactérias não indígenas têm apresentado resultados muito inferiores aos obtidos neste estudo. Isto pode ser atribuído ao fato de bactérias não indígenas em associações não compatíveis com a água que está sendo testada podem responder muito mal às elevadas salinidades. No nosso estudo, assembléias bacterianas indígenas parecem ter uma sobrevivência maior ao choque de salinidade (no nosso caso, 65 PSU). Embora os diversos experimentos previstos inicialmente não tenham podido ser executados, o nosso estudo indica que a maior parte dos valores de $T_{90\%}$ pode estar subestimado, quando o objetivo é simular a balneabilidade das áreas estudadas.

Finalmente, foram realizados numerosos experimentos de modelagem hidrodinâmica, gerando 192 saídas, que estabelecem um quadro bem detalhado da hidrodinâmica da região. Os experimentos indicam que a força mais importante para a hidrodinâmica da laguna é o vento. A maré, nas condições atuais de batimetria do canal de Itajurú, ainda contribui muito pouco com a circulação da água na laguna. Outros experimentos simulando a abertura da laguna na altura de Arraial do Cabo (Canal da Companhia de Álcalis) e na Restinga de Massambaba ainda estão em execução. Não obstante, o impacto ecológico da implantação de múltiplas aberturas na salinidade da laguna de Araruama é imprevisível e sua implantação só deveria ser realizada após estudos mais detalhados.

BIBLIOGRAFIA

- Alves A. R. and Wasserman J. C. (2000a) Avaliação das taxas de assoreamento em lagunas costeiras utilizando modelos numéricos. *Anais do VIII Simpósio sobre Meio Ambiente*, CD-ROM.
- Alves A. R. and Wasserman J. C. (2000b) Modelagem numérica aplicada à previsão dos impactos da abertura da ligação entre uma lagoa costeira e o mar. *Anais do VIII Simpósio sobre Meio Ambiente*, CD-ROM.
- Carmouze J. P. and Barroso L. V. (1989) Recent environmental modifications of the lagoon of Saquarema and its watershed, Rio de Janeiro, Brazil. *International Symposium on Global Changes in South America During Quaternary: Past - Present - Future*, 65-69.
- Harris J. R. W. and Gorley R. N. (1997) *An Introduction to Modelling Estuaries with ECoS3*. Plymouth Marine Laboratory.
- Kjerfve, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: D. A. Wolfe (Ed.). *Estuarine Variability*. New York,: Academic Press,, 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons, p.63-81
- Kjerfve B. and Knoppers B. A. (1999) Physical characteristics of lagoons of the East Fluminense Coast, state of Rio de Janeiro, Brazil. In *Environmental Geochemistry of*

- Coastal Lagoon Systems of Rio de Janeiro, Brazil*, Vol. 6 (ed. B. A. Knoppers, E. D. Bidone, and J. J. Abrão), pp. 57-67. UFF/FINEP.
- Knoppers B. A., Bidone E. D., and Abrão J. J. (1999a) Environmental geochemistry of coastal lagoon systems of Rio de Janeiro. In *Geoquímica Ambiental*, Vol. 6, pp. 210. Programa de Geoquímica - UFF; FINEP.
- Knoppers B. A., Carmouze J. P., and Moreira-Turcq P. F. (1999b) Nutrient dynamics, metabolism and eutrophication of lagoons along the East Fluminense Coast, State of Rio de Janeiro. In *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems of Rio de Janeiro, Brazil*, Vol. 6 (ed. B. A. Knoppers, E. D. Bidone, and J. J. Abrão), pp. 123-154. UFF/FINEP.
- Knoppers B. A., Kjerfve B., and Carmouze J. P. (1991) Trophic state and water turn-over time in six choked coastal lagoons in Brazil. *Biogeochemistry* 14, 149-166.
- Lopes E. J. (2000) População e meio ambiente nas paisagens da urbanização turística do Nordeste: o caso de Natal. In *População e Meio Ambiente. Debates e Desafios* (ed. H. Torres and H. Costa), pp. 213-231. Editora SENAC.
- Schaeffer-Novelli Y. (1989) Perfil dos ecossistemas litorâneos brasileiros com especial ênfase sobre os ecossistemas de manguezais. *Publicação Especial do Instituto Oceanográfico de São Paulo* 7, 1-16.
- Wasserman J. C. (2000) Estudo do Impacto Ambiental da Abertura da Barra da Laguna de Saquarema, pp. 385. Prefeitura Municipal de Saquarema.
- Wasserman J. C. and Alves A. R. (2000) Modelagem da salinidade e ecossistemas costeiros e seus efeitos na vegetação marginal (manguezal e taboal). *6th International Congress and Exhibition on Forestry - Forest 200*, 153-155.
- Wasserman J. C., Cunha L. C., Carneiro M. E., and Knoppers B. A. (1999) The impact of a canal lock upon the water balance and the trophic state of Piratininga Lagoon, State of Rio de Janeiro, Brazil. In *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil*, Vol. Série Geoquímica Ambiental, 6 (ed. B. A. Knoppers, E. D. Bidone, and J. J. Abrão), pp. 161-169. EDUFF.
- Wasserman M. A. M., Latouche C., and Wasserman J. C. (1997) Metal distribution in a sub-tropical coastal lagoon: an statistical approach. In *Les Colloques*, Vol. 85 (ed. R. Prost), pp. contr. n° 76 (CD-ROM). INRA Editions.

Julio Cesar de Faria Alvim Wasserman
Professor Adjunto IV

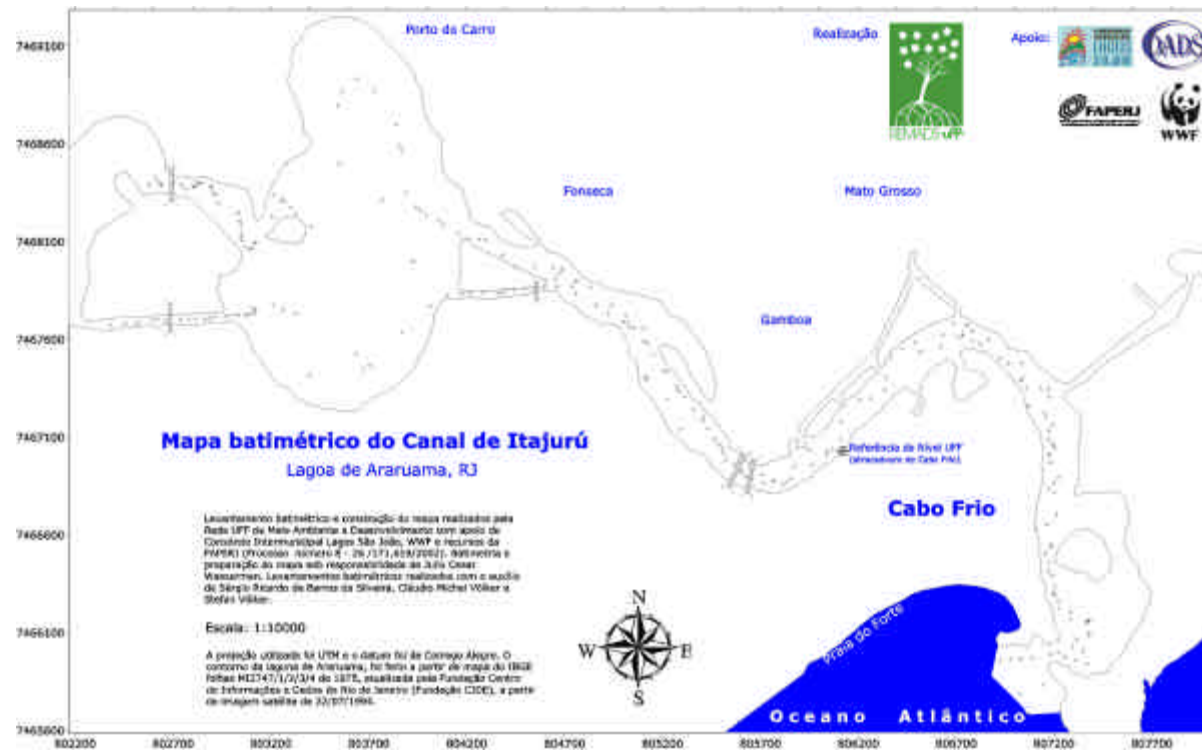


Figura 7: Medições de profundidade ao longo do presente levantamento. Área do canal

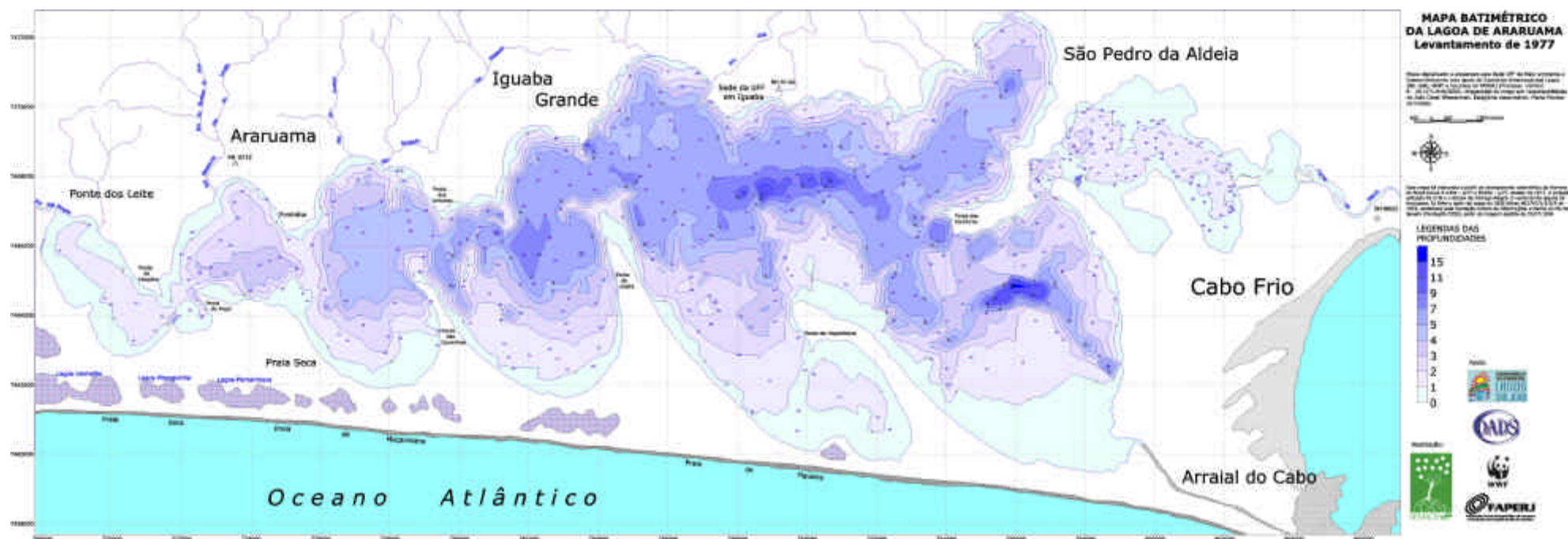


Figura 8: Mapa batimétrico com base em dados de 1977 (Marinha do Brasil)

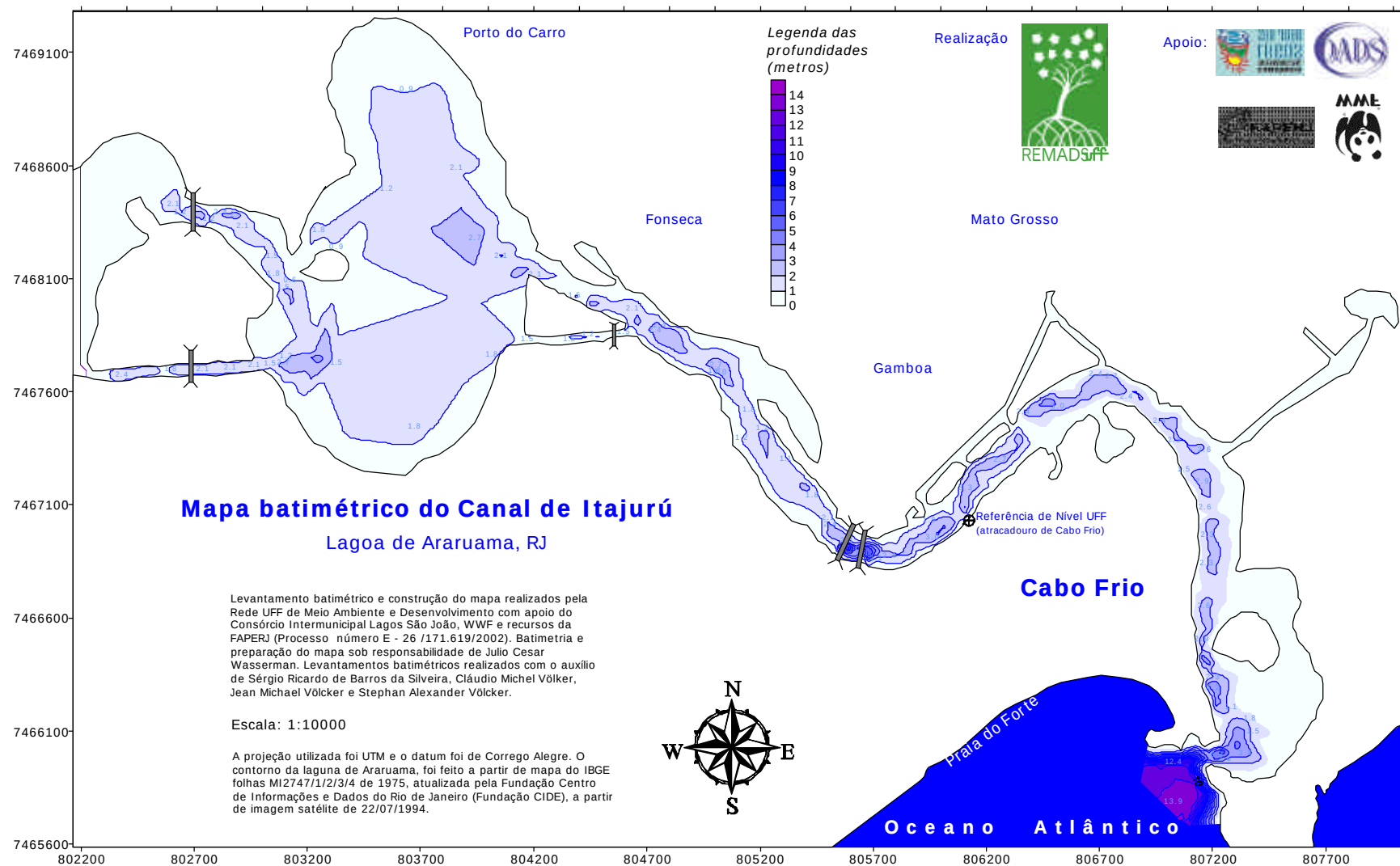


Figura 11: Mapa batimétrico com base em dados levantados neste estudo (2005). Detalhamento do Canal de itajurú.

