



Programa de Pós-Graduação - Mestrado
Recursos Aquáticos e Pesca

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
PROGRAMA DE POS GRADUAÇÃO EM RECURSOS AQUÁTICOS E PESCA**

RÔMULO DE ARAUJO SOARES

**MODELAGEM DO TRANSPORTE DE ICTIOPLÂNCTON NO COMPLEXO
ESTUARINO DE SÃO MARCOS, MARANHÃO – BRASIL.**

**SÃO LUIS - MA
Dezembro 2015**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
PROGRAMA DE POS GRADUAÇÃO EM RECURSOS AQUÁTICOS E PESCA -
PPGRAP**

**MODELAGEM DO TRANSPORTE DE ICTIOPLÂNCTON NO COMPLEXO
ESTUARINO DE SÃO MARCOS, MARANHÃO – BRASIL.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação – Mestrado em Recursos Aquáticos e Pesca para a obtenção do grau de mestre em recursos aquáticos e pesca.

Orientador: Prof. Dr. Audálio Rebelo Torres Júnior.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Audálio Rebelo Torres Júnior
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Profa. Dra. Paula Cilene Alves da Silveira
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Profa. Dra. Verônica Maria de Oliveira
Programa de Pós Graduação em Recursos Aquáticos
e Pesca - PPGRAP

**SÃO LUIS - MA
Dezembro 2015**

Soares, Rômulo de Araujo.

Modelagem do transporte de ictioplâncton no complexo estuarino de São Marcos, Maranhão - Brasil / Rômulo de Araujo Soares. –São Luís, 2015.

59 f

Dissertação (Mestrado) – Curso de Recursos Aquáticos em Pesca, Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Audálio Rebelo Torres Júnior.

1.Baía de São Marcos. 2.Distribuição de ictioplâncton. 3.Circulação no CESM. I.Título

CDU: 574.5(812.1)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todo o corpo docente do PPGRAP pelas valiosas contribuições.

Aos alunos da primeira turma do programa, que estiveram comigo desde o começo desta jornada. Em especial a Karla Bittecourt, Hetty Torres e Débora Batista, que sempre pude contar em todos os momentos.

A toda equipe do LHICEAI (Laboratório de Hidrodinâmica Costeira e Estuarina) – UFMA, por todo apoio no desenvolvimento de todas as etapas deste trabalho, a Vanessa, Vivian Salles e Francisco Dias com todas as orientações e ensinamentos.

A equipe do LIZIC (Laboratório de Zoo e Ictioplâncton) da UFMA, em especial a professora Paula Silene e Deuzenira Silva do Nascimento, que gentilmente se disponibilizaram a identificar as coletas de ictioplâncton realizadas durante a elaboração deste trabalho além de contribuir significativamente no desenvolvimento e metodologias adotadas durante o processo de aquisição de dados.

Aos tripulantes do SPARTANO, Saci, Salomão, Sebá e Moaci.

A minha família pelo apoio incondicional e a Boris (*in memoriam*).

Ao meu orientador Audálio Torres, pelos ensinamentos.



“As pessoas te enfurecem, te entristecem. A força é dada pelas coisas boas; Tua família, teus amigos e a satisfação de trabalhar duro.”

Jax Teller, Sons of Anarchy.

RESUMO

O Complexo Estuarino de São Marcos (CESM) detém características particulares em sua hidrodinâmica, possuindo maré semi diurna, aliada ao regime de macro maré com amplitudes médias de 3,3 metros e podendo superar os 7 metros em períodos de sizígia. A modelagem da dispersão do ictioplâncton foi realizada por meio da modelagem matemática, respondendo as forçantes locais. Para entender a distribuição local, foram realizadas amostragens com redes cilindro cônicas com malha de 300 μm , com arrastos superficiais de 3 minutos em 19 pontos distribuídos em quatro seções amostrais durante o período de um ano. A definição dos principais pontos de retenção da comunidade ictioplanctônica, bem como as principais áreas de transporte, foram identificadas através da interpolação dos dados obtidos em campo. O modelo matemático desenvolvido pela equipe do LHiCEAI da Universidade Federal do Maranhão, conseguiu representar de forma eficiente tanto a circulação das massas de água no CESM quanto o transporte da comunidade ictioplanctônica da região.

Palavras chave: Baía de São Marcos, Distribuição de ictioplâncton, Circulação no CESM.

ABSTRACT

The Estuary Complex of São Marcos (CESM) has particular characteristics in their hydrodynamics, possessing diurnal semi tide, coupled with the regime of macro tide with average amplitudes of 3.3 meters and can overcome the seven meters in times in spring tide. The modeling of the dispersion of ichthyoplankton was done through mathematical modeling, responding to local forcing. To understand the local distribution, samples were made with conical cylinder with mesh nets 300 μm with surface drags during 3 minutes at 19 points distributed into four sections during the sampling period of one year. The definition of the main points of retention ictioplanctonic community as well as the main areas of transport were identified through interpolation of the data obtained in the field. The mathematical model developed by LHiCEAI the team from the Federal University of Maranhão, could efficiently represent both the movement of water bodies in the CESM and the transport of ictioplanctonic community in the region.

Key words: São Marcos Bay, Distribution of ichthyoplankton, CESM circulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização do CESM.....	13
Figura 2 - Precipitações médias históricas para a região do CESM entre os anos de 1961 a 1990. Adaptado do instituto nacional de meteorologia (INMET) site http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos , em dezembro de 2015.	19
Figura 3 - Catamarã utilizado na obtenção dos dados.	20
Figura 4 - Identificação dos pontos, seções e fundeio na obtenção dos dados.	22
Figura 5 - CTD com grade de proteção.	23
Figura 6 - ADCP Sontek utilizado na coleta dos dados.	24
Figura 7 - Representação do conceito Doppler-Fizeau.	25
Figura 8 - Representação de um mapeamento por deslocamento de um ADCP. Adaptado de USGS site http://water.usgs.gov/edu/streamflow2.html , em dezembro de 2014.	26
Figura 9 - Imagem da tela do notebook, mostrando dados da aquisição de dados do ADCP em tempo real.	27
Figura 10 - Rede cilindro cônica, utilizada na obtenção dos dados biológicos.	28
Figura 11 - Fluxômetro para acoplar a rede de Ictioplâncton.	28
Figura 12 - Quantificação do ictioplâncton coletado, etapa laboratorial realizada pela equipe do LIZIC - UFMA.	29
<i>Figura 13 - Representação da grade gerada.</i>	<i>31</i>
Figura 14 - Representação vetorial da velocidade das correntes.	38
Figura 15 - Distribuição espacial do ictioplâncton no CESM, campanha de Novembro de 2014.	40
Figura 16 - Distribuição espacial do ictioplâncton no CESM, campanha de Março de 2015.	41
Figura 17 - Distribuição espacial do ictioplâncton no CESM, campanha de Junho de 2015.	42
Figura 18 - Distribuição espacial do ictioplâncton no CESM, campanha de Setembro de 2015.	44
Figura 19 - Quantificação do ictioplâncton, A: Primeiro fundeio realizado no dia 05 de Março de 2015; B: Segundo fundeio, realizado nos dias 16 e 17 de Setembro de 2015.	45
Figura 20 - Processo de calibração do modelo hidrodinâmico.	46
Figura 21 - Identificação dos pontos de análise da amplitude de maré.	47
Figura 23 – Confronto da amplitude de maré obtida com maré modelada, para a região do Píer 4 da VALE.	Erro! Indicador não definido.
Figura 24 - Propagação da onda de maré no CESM; A, hora 01; B, hora 02; C, hora 03; D, hora 04; E, hora 05; F, hora 05; G, hora 08; H, hora 09.	49
Figura 25 - Fonte de Ictioplâncton para o modelo de transporte.	50
Figura 26 - Série de 12 horas amostrais para o transporte de Ictioplâncton.	51
Figura 27 – Transporte de uma constituinte no CESM; A, Ponto inicial do modelo; B, Hora 10; C, Hora 20; D, Hora 30; E, Hora 40; F, Hora 50; G, Hora 60; H, Hora 70; I, Hora 80; J, Hora 90; K, Hora 100; L, Hora 110; M, Hora 120.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização dos pontos quanto à estratificação.....	16
Tabela 2 - Coordenadas dos pontos amostrais de dados.	21
Tabela 3 - Representação da velocidade das correntes, nos períodos seco e chuvoso.....	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. HIPÓTESE	12
1.1.1. Propósito	12
1.1.2. Objetivos.....	12
2. ALGUNS ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS DO CESM	12
2.1. Massas de água	14
2.2. Hidrodinâmica	15
2.3. Distribuição local do Ictioplâncton.....	17
3. MÉTODOS.....	18
3.1. AQUISIÇÃO DE DADOS	18
3.1.1. Amplitude de maré	18
3.1.2. Aspectos Meteorológicos	18
3.1.3. Dados de batimetria e linhas de costa	20
3.1.4. Dados <i>in situ</i>	20
3.1.4.1. Correntes, salinidade e temperatura	23
3.1.4.2. Ictioplâncton	27
3.2. ANÁLISE DAS INFORMAÇÕES	29
3.2.1. Velocidade e direção das correntes	29
3.2.2. Modelo Digital do Terreno.....	30
3.2.3. Modelagem hidrodinâmica.....	31
3.2.4. Modelo de transporte	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1. CORRENTES	37
4.2. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ICTIOPLÂNCTON.....	39
4.3. EXPERIMENTO	45
4.3.1. Calibração e Validação do Modelo de Hidráulica	46
4.3.2. Transporte de larvas.....	50
5. CONCLUSÕES	54
6. BIBLIOGRAFIA.....	55

1. INTRODUÇÃO

O ictioplâncton compreende os estágios iniciais da vida dos peixes e constitui um componente de grande importância dentro das comunidades planctônicas. Durante seu desenvolvimento, larvas e juvenis de peixes utilizam uma grande variedade de habitats, desde a plataforma continental (área de desova da maioria das espécies marinhas), até lagoas costeiras, baías, estuários, incluindo a interface com a água doce (HOSS; THAYER, 1993). O estudo desta comunidade específica possibilita o conhecimento de áreas de desova e desenvolvimento inicial das espécies de peixes.

A fase planctônica é um período crítico do desenvolvimento das espécies, onde os padrões de abundância e distribuição espaço-temporal das comunidades, são reflexos da interação de vários fatores abióticos e bióticos no meio em que vivem (GUICHARD *et al.*, 2004; SASSA *et al.*, 2003). No que diz respeito aos fatores abióticos, incluem, em suma, o regime pluviométrico, o ciclo de maré, os ventos, dinâmica das correntes e os parâmetros ambientais de qualidade da água (CURY; ROY, 1989; HARE, 2005; KURTZ; MELLO; ANDRADE, 2004).

Estudos alusivos à comunidade ictioplanctônica e a relação destes organismos ao seu habitat, demonstram uma importância fundamental no conhecimento relacionado as flutuações dos estoques pesqueiros (ARAÚJO; DONALD, 1988; GALUCH *et al.*, 2003). Este conhecimento é essencial para a percepção da dinâmica populacional dos peixes e a exploração sustentável de espécies de importância comercial (HEMPEL, 1973; RÉ, 1999; LAIDIG; SAKUMA; STANNAD, 2004; TOLAN; NEWSTEAD, 2004).

No entanto as dificuldades de análise da ictiofauna, tendo em vista o esforço de coleta, tamanho dos indivíduos, torna utilização da ictiofauna uma lacuna ainda pouco explorada em diversas regiões do Brasil (CAVICCHIOLI *et al.*, 1997; LEIS; CARSON, 2000; SANCHES *et al.*, 2008).

Dados sobre a composição taxonômica do ictioplâncton no Maranhão são relatados por Soares; Cutrim; Silveira, (2014) para a bacia hidrográfica do rio Bacanga. De acordo com os autores, o ictioplâncton da bacia do rio Bacanga apresentou um padrão espacial composto por grupos associados as áreas de influência marinha (externa), que são determinados pela salinidade. Toda a

identificação desse estudo foi desenvolvida de acordo com a sequência das ordens e famílias, descritas por Nelson (2006). No entanto, estudos sobre a comunidade ictioplanctônica do Complexo Estuarino de São Marcos são praticamente inexistentes, bem como a ausência de conhecimento taxonômico e compreensão da distribuição espacial e movimentação das larvas.

O transporte e distribuição espacial do ictioplâncton no fluido são influenciados pela movimentação das massas de água. Estas, relacionadas a fatores naturais como precipitações, correntes de ar e vazão dos rios da região, além dos fatores antrópicos (PARRISH et al. 1981). A complexa relação entre a distribuição da ictiofauna sob efeito das variáveis locais, torna o estudo desta comunidade pouco previsível (NORTHCOTE, 1998). Para que compreender o comportamento desta comunidade relacionada as forçantes hidráulicas locais fizemos o uso da modelagem matemática, onde em ambiente de simulação pode-se reproduzir os padrões ambientais nas mesmas condições da região de estudo.

Neste trabalho, objetivou-se modelar o transporte das plumas ictioplanctônicas no Complexo Estuarino de São Marcos - CESM, com o intuito de entender o comportamento da distribuição do ictioplâncton relacionados às forçantes hidráulicas presentes na região de estudo.

1.1. HIPÓTESE

É possível reproduzir a dispersão do ictioplâncton no CESM por meio da modelagem matemática?

1.1.1. Propósito

O propósito deste trabalho é modelar a dispersão de ictioplâncton no CESM sob condições hidrodinâmicas específicas.

1.1.2. Objetivos

- I. Avaliar a relação entre a hidrodinâmica, a sazonalidade e o transporte do ictioplâncton no complexo estuarino;
- II. Identificar os principais pontos de concentração da comunidade ictioplanctônica na área estudada;
- III. Simular por meio da modelagem computacional, a dinâmica de transporte do ictioplâncton em um período para região.

2. ALGUNS ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS DO CESM

O CESM faz limite com o oceano atlântico ao norte, a leste com o Piauí e a oeste com o Estado do Pará. Contudo, o Maranhão é o único estado da região nordeste que apresenta uma parcela de sua área coberta pela floresta amazônica, além de representar o segundo maior litoral do país em extensão. Na região Norte do Estado, fica localizado o Golfão Maranhense que é constituído pela baía de São José, do Arraial e pelo Complexo Estuarino de São Marcos – CESM e separados pela ilha de São Luís (SOUZA FILHO, 2005) (Figura 1). De acordo com Teixeira; Sousa (2009), o golfão faz parte das regiões tropicais úmidas, as quais se estendem entre as latitudes de 15°N e 15°S. Estes ambientes são de grande importância, tendo em vista que neles estão contidos metade da água doce, partículas e solutos oriundos do oceano (MIRANDA et al., 2002). Seguindo a definição de Miranda et al. (2002), podemos classificar essa região como um estuário. Assim, a região do CESM faz parte

de um conjunto de estuários e reentrâncias possuindo cerca de 5.414 km² de manguezais (SOUZA FILHO, 2005).

O CESH possui área aproximada de 3.000,00 m², compreendendo desde a divisão do rio Mearim pela Ilha dos Caranguejos até sua saída para a plataforma continental. A profundidade média da região é de 10 metros, podendo variar até profundidades maiores de 50 metros.

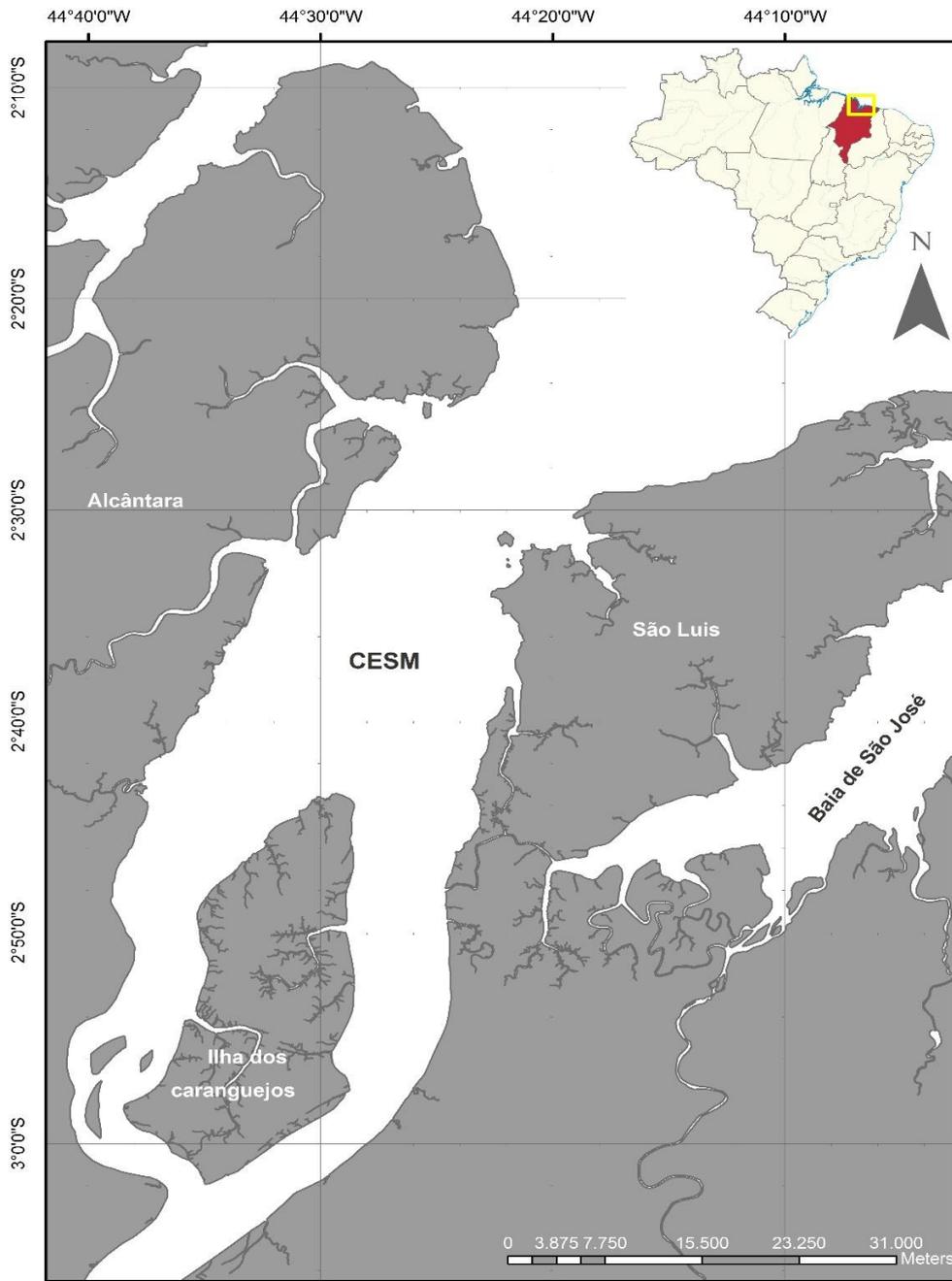


Figura 1 - Localização do CESH.

2.1. Massas de água

As massas d'água são camadas de água presentes nos oceanos que conservam traços físicos de temperatura e salinidade, elas retêm as características de sua formação só podendo ser alteradas por processos de mistura com outras massas d'água (NESHYBA, 1987; PONTES; EL-ROBRINI, 2008).

Os trabalhos alusivos ao comportamento de massas de água na região do Estado do Maranhão, estão associados aos documentos subordinados ao REVIZEE, que foi executado pelo Governo Federal. Este programa teve como intuito compreender a conduta relacionada à exploração, aproveitamento, conservação e gestão dos recursos vivos da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Brasil, sendo definida como uma área que se estende desde o limite exterior do Mar Territorial, de 12 milhas de largura, a até 200 milhas náuticas da costa, no caso do nosso País (MMA, 2006).

Entre o limite da costa até a fronteira do mar territorial na plataforma continental do Maranhão, pode-se observar desde águas de características estuarinas próximas a costa, até as águas de características tropicais no limite do mar territorial (PONTES, 2008). Segundo Linhares (1995), a água tropical apresenta valores de temperatura entre 20,1° e 29,5° C, e salinidades superiores a 36. Santos (2000) já considera que a água tropical é um tipo de água que possui temperaturas maiores do que 18° C, salinidade maior que 36 e que atinge uma profundidade máxima de 150m.

Para a plataforma continental do Maranhão, Pontes; El Robrini (2008) relatam que durante o período de seca, a contribuição fluvial é bem pequena, não influenciando nas massas de água presentes na quebra da plataforma, explicando assim a presença de somente água de característica tropical, tipicamente oceânicas na região.

Neste mesmo estudo, o autor relata uma característica observada tanto na borda da plataforma quanto dentro do CESH, uma constância das massas de água em sua feição vertical, ou seja, um ambiente bem misturado.

Pontes; El Robrini (2008), descrevem o comportamento da temperatura e salinidade em águas mais rasas próximas a costa, durante o período seco. E que as isotermas e isohalinas são verticais, sendo, portanto, a coluna d'água da plataforma continental do Maranhão apresenta características totalmente homogêneas.

2.2. Hidrodinâmica

O complexo Estuarino de São Marcos (CESM) possui uma maré do tipo semi diurna, aliado ao regime de macro maré com amplitudes médias de aproximadamente 3,3m chegando a uma altura superior a 7 m em períodos de sizígia e eventos meteorológicos (KJERFVE; LACERDA, 1993; MOLION; BERNARDO, 2002), indicando ser um ambiente bem misturado (HAYES, 1975). Esta dinâmica é influenciada pela ocorrência de múltiplos fenômenos, sendo possível destacar: o escoamento fluvial; o vento; além da morfologia local.

Para classificarmos este ambiente como bem misturado, foi utilizada a definição proposta por Pritchard; Carter (1971), onde os gradientes de salinidade em profundidade e a intensidade da circulação no interior do sistema, permitem classificar um estuário em:

- Estratificados (Com clara demarcação de cunha salina);
- Parcialmente misturados;
- Bem misturados (Onde não se consegue diferir as massas de água).

Um ambiente aquático bem misturado caracteriza-se por sua alta instabilidade, ou seja, há condições propícias à mistura forçada mecânica ou termodinamicamente.

Grande parte dos sistemas estuarinos ao redor do mundo sofrem influência direta das águas da plataforma continental ao largo (água de origem marinha) e da descarga fluvial (água doce), que por sua vez se misturam e dão origem a uma massa de água transitória. Essa mistura pode ser parcial, em uma interface ou ocorrer de forma total. Para Miranda, et al.,(2002) a variação vertical das isohalinas e isotermas, em uma primeira aproximação, podem auxiliar a classificar os estuários como: Cunha Salina, Parcialmente Misturados e Bem Misturados. Portanto, ao incluir quantidade de movimento, um fluido estaticamente estável poderá se tornar instável, logo, misturado. Vamos então abordar a questão do ponto de vista da estabilidade dinâmica.

Uma forma clássica de entender a questão é utilizar o número de Richardson estuarino, como proposto por Fisher (1979):

$$N_e = \frac{g \cdot \Delta \rho (h_0 \cdot u_f)}{\rho \cdot v^3} , \quad \text{Eq. 1}$$

Onde g é a gravidade, ρ é a densidade, u_f é a velocidade do rio em (m.s⁻¹), v é a amplitude de maré em m.s⁻¹ e h_0 é a profundidade na boca do estuário.

O mesmo autor usando os critérios estabelecidos por Hansen; Rattray, (1966), ainda define a estratificação do fluido em um sistema estuarino é definida pela razão:

$$\frac{\delta S}{\bar{S}} \quad \text{Eq. 2}$$

onde δS é a diferença dos valores estacionários na superfície e no fundo, e \bar{S} é o valor da salinidade média na coluna de água. Quando a razão de estratificação é muito maior que 1 ($\delta S/\bar{S} \gg 1$) o estuário é altamente estratificado (Cunha Salina); e quando este valor é muito menor que 1 ($\delta S/\bar{S} \ll 1$) oscilando entre 10⁻¹ e 10⁻⁵ é considerado fracamente estratificado (Parcialmente Misturado), e tende a zero ($\delta S/\bar{S} \cong 0$) o estuário é verticalmente homogêneo (Bem Misturado).

Para o CESM, podemos observar os seguintes resultados:

Tabela 1 - Caracterização dos pontos quanto à estratificação.

Pontos	Profundidade (metros)	Média (minutos)	Richardson Estuarino
1	21	20	0,018
2	21	30	0,008
3	32	30	0,015
4	13,5	28	0,005
5	18	29	0,01
6	11	57	0,002
7	7	45	0,003
8	14,5	21	0,003
9	17,5	47	0,004
10	5	37	0,001
11	19,5	24	0,009
12	4	14	0,002
13	4,5	11	0,005
14	10	70	0,009
15	9	22	0,023
16	5,5	41	0,001
17	14,5	56	0,004
18	24	15	0,015
19	1,5	14	0,0005
Médias	15,21	32,16	0,0072

De acordo com Fisher (1979), para um corpo estuarino ser caracterizado como bem misturado, o número de Richardson estuarino deve ser < 0,08. A partir dos resultados obtidos, onde o maior valor para o número de Richardson Estuarino foi de 0,018. Observando os resultados da (Tabela 1), podemos notar a média do número de Richardson Estuarino na casa dos 10⁻⁴, portanto de acordo com o método proposto por Miranda et al.(2002), e concordando com as proposições de Pontes (2008) e El

Robrini (2008), o CESM é classificado como pouco ou nada estratificado, ou seja, bem misturado.

2.3. Distribuição local do Ictioplâncton

Os estágios de desenvolvimento em que a larva se encontra podem ocasionar variações nos padrões de abundância e distribuição no ambiente, uma vez que existem períodos críticos que refletem altas taxas de mortalidade e vulnerabilidade das larvas. Por exemplo, a transição do tipo de alimentação endógena para a exógena (SANTIN; BIALETZKI; NAKATANI, 2009), ou ainda os “treshholds”, segundo a teoria saltatória de Balon (1971), estes considerados como períodos terminantes para o desenvolvimento das larvas de peixe. A abundância e adequação dos alimentos, também influenciam na distribuição desta comunidade (CUSHING, 1969).

A presença de predadores, em segundo instante, aliada à alimentação são apontados como severas causas de mortalidade larval (GERKING, 1994). Resultados dos estudos demonstraram altos valores de abundância do ictioplâncton seguido por grande número de predadores (FARIA; HAYASHI; SOARES 2008; PARADIS; PEPIN; BROWN 1996). Além de influenciar os padrões de distribuição e abundância no sentido horizontal, os fatores abióticos e bióticos considerados, também refletem na distribuição vertical dos indivíduos ictioplanctônicos. Apesar de Joyeux; Pereira; Almeida (2004), afirmarem que o ictioplâncton apresenta uma distribuição agregada na coluna da água, horizontalmente e verticalmente dentro de uma escala temporal e espacial. A profundidade da desova dos peixes (WERNER et al., 1993), a concentração e garantia de alimento, os estágios nos quais os indivíduos se encontram (POWER, 1984), a flutuabilidade dos ovos e das larvas (LOPES et al., 2006), a intensidade da luz, a proteção contra predadores (LEIS, 2000), a temperatura da água e a velocidade das correntes (HOUDE, 1997), são fatores indicados para justificar o comportamento vertical do ictioplâncton.

Para a região de estudo, a comunidade tende a se localizar mais próxima da superfície tendo em vista a pouca produção primária relacionada a baixa penetração da luz na coluna d`água, fatores como morfodinâmica local, as correntes fortes e a

presença de grandes estuários, também são influentes na distribuição do ictioplâncton.

3. MÉTODOS

Esta seção trata do modelo hidrodinâmico e o modelo de transporte, o processo de construção da grade, os métodos de medição dos dados abióticos e da coleta da comunidade ictioplanctônica.

3.1. AQUISIÇÃO DE DADOS

3.1.1. Amplitude de maré

Os dados de amplitude de maré utilizados neste trabalho, foram cedidos pela empresa VALE S.A., esta possui uma estação fixa instalada em um de seus atracadouros para aferir a amplitude de maré visando a segurança das embarcações. O espaço de tempo monitorado foi de aproximadamente 4 anos, no período de janeiro de 2012 a outubro de 2015.

3.1.2. Aspectos Meteorológicos

O Estado do Maranhão, muito embora esteja incluído na região nordeste, é pouco afetado por fenômenos de seca, pois sofre influência direta da região amazônica. Desta forma o estado apresenta características de Norte, Centro e Centro-Oeste, variando de acordo com a aproximação de áreas limítrofes.

O CESM, assim como todo o estado, apresenta dois períodos distintos no tocante a pluviosidade: um correspondente ao período chuvoso, meados de janeiro a junho, outro referente ao período de estiagem, entre os meses de julho a dezembro, (IBGE, 1997). Na Figura 3, está representada a serie temporal dos últimos 30 anos da pluviosidade na região do CESM. Observa-se de janeiro a junho a estação chuvosa,

com o máximo pluviométrico em abril. No segundo semestre tem-se a estação seca, onde outubro é o mês mais seco (INMET, 2015).

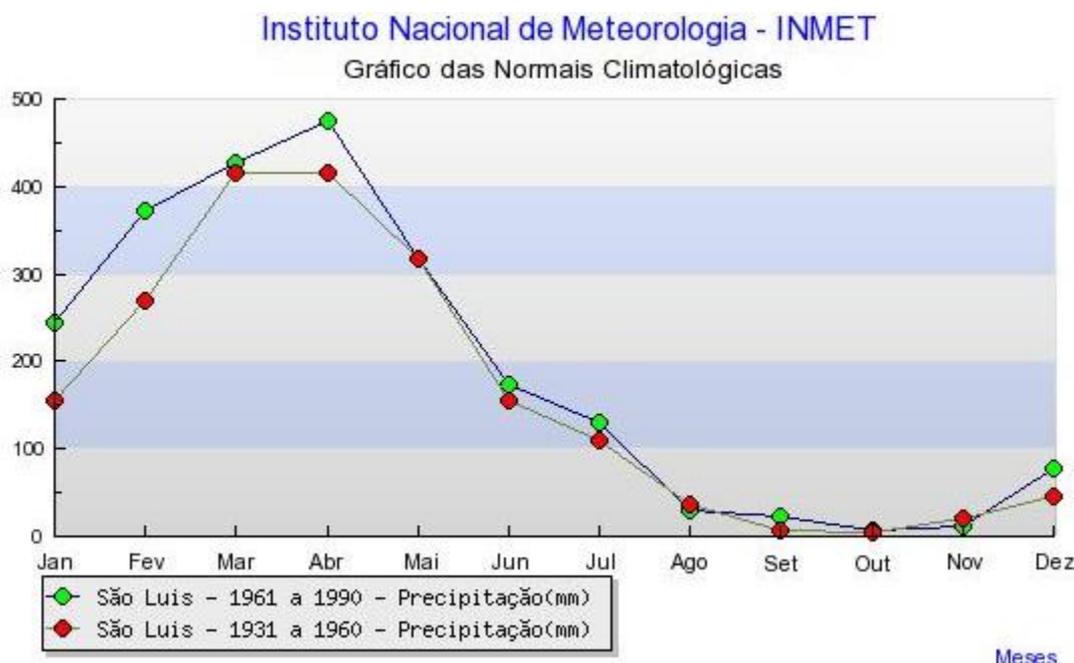


Figura 2 - Precipitações médias históricas para a região do CESM entre os anos de 1961 a 1990. Adaptado do instituto nacional de meteorologia (INMET) site <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>, em dezembro de 2015.

Os ventos característicos da região são os alísios na direção NE, com intensidade média de $2,61 \text{ m.s}^{-1}$ com máximas de velocidades nos meses de outubro e novembro com intensidade média de $3,90$ e $3,93 \text{ m.s}^{-1}$ respectivamente, o que é ligada a migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), mais ao norte nesta época do ano (INMET, 2015).

A ZCIT é uma região onde ocorre a confluência dos ventos alísios de nordeste, oriundos do sistema de alta pressão ou anticiclone subtropical do Hemisfério Norte (H.N), e dos ventos alísios de sudeste, oriundos da alta subtropical do Hemisfério Sul (H.S). Sendo caracterizado por uma banda de nebulosidades e chuvas no sentido aproximado de leste – oeste (MOLION; BERNARDO, 2002). Melo et al., (2009), mostram que a ZCIT apresenta comportamento mais zonal nos meses entre julho a setembro sobre o Oceano Atlântico Tropical Norte, quando atinge sua posição mais ao norte. Enquanto que nos meses de novembro e dezembro, a ZCIT inicia seu deslocamento para o Hemisfério Sul.

3.1.3. Dados de batimetria e linhas de costa

Os dados de batimetria utilizados neste trabalho, são os mesmos disponibilizados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil - DHN, (2015), estes ainda foram complementados com dados obtidos de Coutinho, (1976); Pitombeira; Morais, (1977). A linha de costa foi trabalhada seguindo as cartas náuticas nº 410, 411 e 412, disponibilizadas pela DHN.

3.1.4. Dados *in situ*

A aquisição dos dados foi realizada com auxílio de um catamarã de médio porte de propriedade e tripulação particular denotado SPARTANO Figura 3, este tipo de embarcação é a mais indicada para a região de estudo pois possui estabilidade e calado relativamente baixo.



Figura 3 - Catamarã utilizado na obtenção dos dados.

A estratégia amostral foi dividida em dados pontuais onde foram adquiridos dados de (CTD e Ictioplâncton), seções amostrais para os dados de (ADCP) além de dois fundeios obtendo dados de (CTD, ADCP e Ictioplâncton), no total foram realizadas 90 amostragens de ictioplâncton em diversos pontos distribuídos horizontalmente na área de estudo, além dos dados de ADCP e CTD. O período amostral foi de um ano sendo distribuído em ciclos trimestrais para as seções, e bi anuais para os fundeios, compreendendo assim duas campanhas amostrais e um fundeio no período chuvoso e outra série amostral idêntica no período de estiagem.

As primeiras coletas ocorreram em novembro de 2014, seguidos de março de 2015, junho de 2015 e finalizando em setembro do mesmo ano, onde os dados pontuais foram obtidos em quatro seções transversais no CESH Tabela 2, e foram distribuídos em duas formas, dados pontuais que são dados mensurados em pontos fixos nas seções e os dados contínuos que foram realizadas pós-coletas pontuais da margem esquerda para direita.

Tabela 2 - Coordenadas dos pontos amostrais de dados.

SEÇÕES	PONTOS	Coordenadas		UTM - Z 23M	
		W	S	LAT	LON
SEÇÃO 1	P1-1	44°37'10.60"	2°48'24.25"	9690221.00	539263.00
	P1-2	44°36'11.00"	2°48'21.20"	9689877.00	541374.00
	P1-3	44°35'29.40"	2°48'48.25"	9689504.00	543659.00
	P1-4	44°35'2.00"	2°48'22.00"	9689188.00	545680.00
SEÇÃO 2	P2-1	44°28'37.20"	2°47'50.70"	9690117.00	557891.00
	P2-2	44°27'37.30"	2°47'59.00"	9690068.00	559718.00
	P2-3	44°26'44.00"	2°48'26.70"	9689988.00	561692.00
	P2-4	44°25'34.00"	2°48'37.00"	9689907.00	563817.00
	P2-5	44°25'2.40"	2°48'30.70"	9689828.14	565448.53
SEÇÃO 3	P3-1	44°32'56.83"	2°35'31.26"	9713488.00	550072.00
	P3-2	44°30'43.78"	2°36'09.31"	9712058.00	555259.00
	P3-3	44°28'29.16"	2°36'46.43"	9710633.00	560437.00
	P3-4	44°26'13.73"	2°37'23.63"	9709191.00	565621.00
	P3-5	44°24'0.20"	2°38'01.27"	9707942.00	570210.00
SEÇÃO 4	P4-1	44°23'5.67"	2°24'26.25"	9733904.00	568385.00
	P4-2	44°21'31.01"	2°26'1.80"	9731765.00	570508.00
	P4-3	44°19'56.56"	2°27'37.34"	9729471.00	572784.00
	P4-4	44°18'21.82"	2°29'13.15"	9727206.00	575041.00
	P4-5	44°18'22.07"	2°29'13.45"	9725082.00	577140.00
FIXO		44°22'00.8"	2°35'47.20"	570378.00	9712997.00

O ponto fixo foi definido bem ao centro do CESH, onde foram observados campos de velocidade superior à média da região, a distribuição espacial dos pontos

de coleta, além das radiais e do ponto de fundeio, são representados na Figura 04.

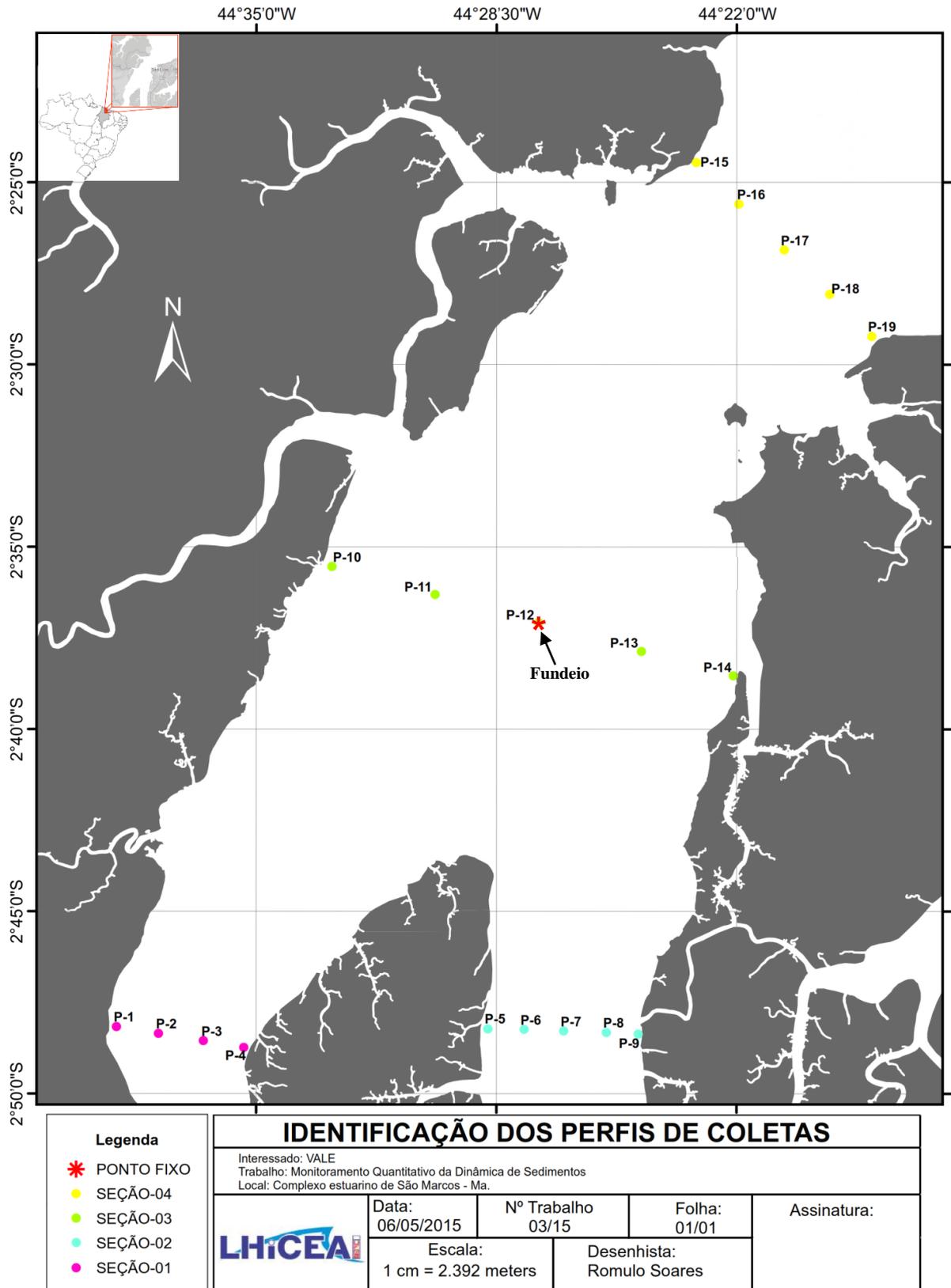


Figura 4 - Identificação dos pontos, seções e fundeio na obtenção dos dados.

3.1.4.1. Correntes, salinidade e temperatura

As coletas de dados físicos foram distribuídas em duas formas: as discretas, onde se fez uso de um CTD para obtenção dos perfis verticais dos parâmetros físicos e a amostragem contínua, onde se foi utilizado um ADCP para a obtenção da variação espacial das correntes.

A aquisição dos perfis verticais de temperatura foi obtida em pontos distribuídos simetricamente nas seções. Os perfis de temperatura foram mensurados com auxílio de um CTD (Conductivity Temperature and Depth) que mede a condutividade, temperatura e pressão (profundidade) em um perfil vertical na coluna d'água. Para aquisição de dados, o CTD foi imerso na coluna d'água de forma lenta, com frequência de amostragem de 4Hz, a resolução do sensor de temperatura foi de 0,001°C; o de condutividade 0.001 a 0.01mS/cm e a resolução do sensor de profundidade foi de 0.001 m (0.001 ft).

Assim como os demais equipamentos utilizados no CESM, este foi previamente lastreado de forma a diminuir a influência das correntes no deslocamento horizontal em relação à vertical, Figura 5.



Figura 5 - CTD com grade de proteção.

A variação espacial das correntes foi estimada com o sensor de movimento de fluidos baseado em acústica submarina conhecido como Acoustic Doppler Current Profile (ADCP) fabricado pela SONTEK, com frequência de 500 MHz. O mesmo foi acoplado numa prancha presa à embarcação, Figura 6.



Figura 6 - ADCP Sontek utilizado na coleta dos dados.

A técnica de sensoriamento do ADCP é baseada na propagação do som em fluidos, além de técnicas de processamento digital de sinais para obtenção de estimativas do movimento dos mesmos.

O princípio básico é o conhecido efeito Doppler-Fizeau, que explica as variações dos comprimentos de onda sonoras emitidas por uma fonte móvel, a saber. Consideremos uma fonte sonora em deslocamento segundo a representação da Figura 7:

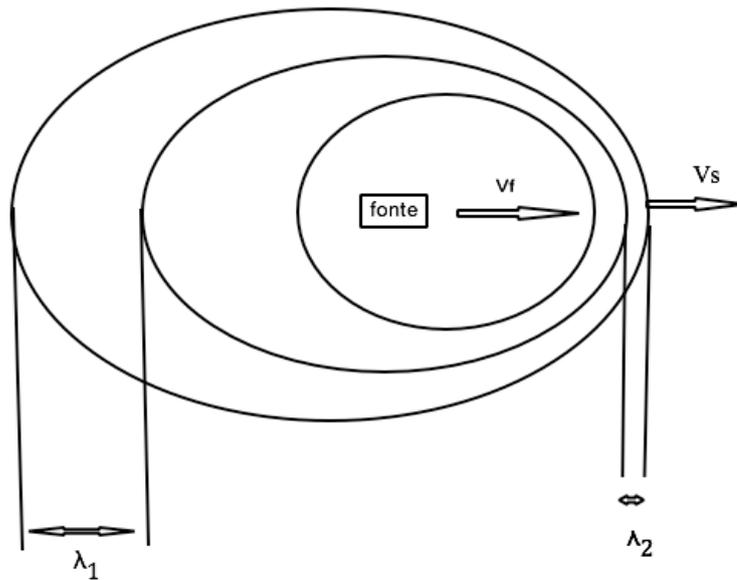


Figura 7 - Representação do conceito Doppler-Fizeau.

Onde v_f é a velocidade do deslocamento da fonte sonora, v_s é a velocidade da onda sonora, λ_1 e λ_2 são as distâncias entre cristas das ondas sonoras a ré e a vante da fonte sonora.

Aplicando a conhecida relação da mecânica clássica que define a velocidade de um corpo em movimento como a razão entre seu deslocamento no espaço em um determinado intervalo de tempo:

$$v = \frac{\delta \lambda}{\delta t}$$

Eq. 3

A partir deste, podemos escrever para a fonte sonora se afastando do receptor:

$$\lambda_1 = (v_s + v_f) \cdot \delta t = (v_s + v_f) \frac{\lambda_f}{v_s} = \left(1 + \frac{v_f}{v_s}\right) \cdot \lambda_f \quad \text{e}$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\left(1 + \frac{v_f}{v_s}\right) \cdot \lambda_f - \lambda_f}{\lambda_f} = \frac{v_f}{v_s}$$

Para a fonte sonora se aproximando do receptor:

$$\lambda_2 = (V_s + V_f) \cdot \delta t = (V_s - V_f) \frac{\lambda_f}{V_s} = \left(1 - \frac{V_f}{V_s}\right) \cdot \lambda_f \quad \text{e}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\left(1 - \frac{V_f}{V_s}\right) \cdot \lambda_f - \lambda_f}{\lambda_f} = -\frac{V_f}{V_s} \quad \text{Eq. 5}$$

Com a utilização dos dados obtidos pelo ADCP, podemos mensurar a chegada das ondas sonoras ao transdutor e estimar as variações dos comprimentos de ondas emitidos pelas camadas do fluido e a partir das equações deduzidas estimar a velocidade da fonte.

Desta forma é possível mapearmos as velocidades de descolamento das partículas, deslocando o ADCP ao longo de uma linha, uma seção vertical do fluido, como ilustrado na Figura 8:

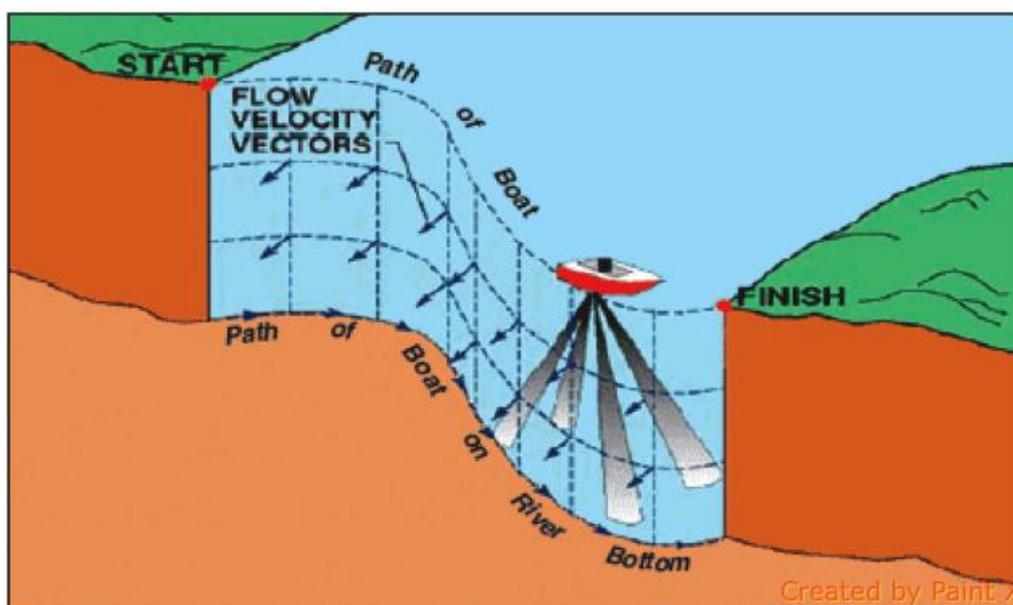


Figura 8 - Representação de um mapeamento por deslocamento de um ADCP. Adaptado de USGS site <http://water.usgs.gov/edu/streamflow2.html>, em dezembro de 2014.

O intervalo de aquisição de dados foi de 5 segundos, acoplado ao uso do sistema *Bottom Tracking* que rastreia a profundidade e a usa como referencial para o fundo do canal. A extensão vertical de cada célula foi fixada em 100 ou 200 cm de acordo com a profundidade preestabelecida no planejamento em terra, a distância de branco foi de 100 cm e alcance máximo de 100 m. Os dados de corrente foram adquiridos e acompanhados em tempo real, Figura 9.

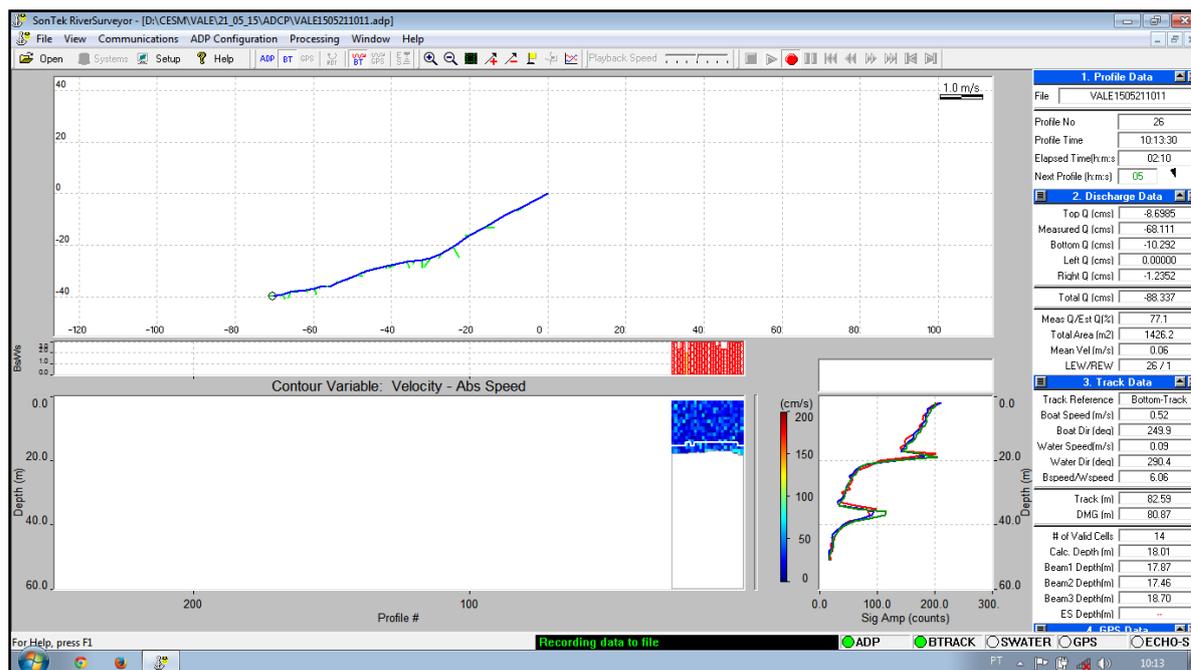


Figura 9 - Imagem da tela do notebook, mostrando dados da aquisição de dados do ADCP em tempo real.

3.1.4.2. Ictioplâncton

A aquisição destes dados foi realizada utilizando técnica de arrasto horizontal na camada superficial (camada entre 0 e 1 m), seguindo o método proposto por Smith, (1977), para tal, foi utilizada rede cilindro cônica com malha de 300 μm Figura 10. Afim de mensurar o volume de água filtrado pela rede, foi instalado um fluxômetro marca Hydro Bios®, modelo 438 115 Figura 11.

Os arrastos horizontais, tiveram duração de 3 minutos e foram executados a uma velocidade de 2 nós. No fundeio, os arrastos foram realizados utilizando o escoamento natural, o intervalo de coleta foi de 2 horas, totalizando 14 horas amostrais, ou seja, um ciclo de maré. O material coletado foi fixado em formol a 4% e sua quantificação foi realizada com o auxílio de lupa da marca ZEISS® modelo Stemi DV4, com resolução focal de 8-32x (Figura 12), pertencente ao Laboratório Integrado de Zooplâncton e Ictioplâncton – LIZIC, da Universidade Federal do Maranhão – UFMA, tendo como referência as seguintes obras: (RICHARDS, 2005; MOSER, 1996; OLIVAR; FORTUNO, 1991; OKIYAMA, 1988).

A densidade (Larvas/100 m³), foi obtida a partir do quociente entre o número total de ovos ou de larvas obtidos em cada amostra (N) e o volume de água filtrada (V), através da fórmula: $N/100 \text{ m}^3 = (N/V) * 100$. O cálculo do volume de água filtrada pela rede foi realizado através da seguinte fórmula: $V = a.n.c$, onde: V = volume de água filtrada (m³); a = área da boca da rede (m²), n = número de rotações do fluxômetro durante o arrasto (rot) e c = fator de aferição do fluxômetro (m.rot⁻¹)



Figura 10 - Rede cilindro cônica, utilizada na obtenção dos dados biológicos.



Figura 11 - Fluxômetro para acoplar a rede de Ictioplâncton.



Figura 12 - Quantificação do ictioplâncton coletado, etapa laboratorial realizada pela equipe do LIZIC - UFMA.

3.2. ANÁLISE DAS INFORMAÇÕES

Nesta seção estão descritas as técnicas de análises e processamento utilizadas. A velocidade das correntes, a elaboração do modelo digital do terreno, o modelo de hidrodinâmica e o modelo de transporte.

3.2.1. Velocidade e direção das correntes

O método utilizado para processar as componentes de velocidade e direção foi baseado em Dias, (2011).

O vetor velocidade foi decomposto na componente longitudinal u (" Ao longo do canal ") e transversal v (" Cruzando o Canal "), utilizando a equação 10:

$$r = (d \pm \gamma) \quad \text{Eq. 6}$$

Onde r é a componente projetada em relação ao eixo; d é a componente em relação ao norte magnético e γ é o ângulo do eixo longitudinal. A partir dessa decomposição, MIRANDA et al. (2002) propôs que a correção final na direção ϕ é dada pela equação:

$$\text{Eq. 7}$$

$$\phi = 90^{\circ} - (dd \pm D) \pm \gamma$$

Onde ϕ é a direção da corrente; dd a direção vetorial mensurada pelo equipamento e D , a correção dada pela declinação magnética. O ângulo utilizado para a correção da declinação foi de 22° em todas as seções.

Os dados resultantes de todas as seções passaram por um acurado tratamento a fim de manter o mínimo de confiabilidade sobre os mesmos. Para tal, realizamos a remoção de dados espúrios (registros que excederam a média do conjunto de dados em mais ou menos três vezes o desvio padrão) a partir da aplicação de uma janela móvel regular. As lacunas na série original, criadas pela remoção dos dados espúrios, foram preenchidas com uso de interpolação linear, não excedendo um total de 1% da série original.

3.2.2. Modelo Digital do Terreno

A grade utilizada no modelo hidráulico foi obtida com o auxílio da técnica de interpolação espacial Kriging (ASA *et al*, 2011). O método basicamente utiliza técnicas estatísticas para produzir uma distribuição de pesos baseada em características das variâncias observadas e da métrica das distâncias entre os pontos de interpolação e as amostras. Estes pesos são então utilizados na produção de malhas ou grades regulares de distribuição da propriedade que se está interpolando.

O arquivo trabalhado foi baseado nas cartas náuticas nº 410, 411, 412, 413 e 414, fornecidas pela Diretoria Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), além de imagens de satélite georeferenciadas fornecidos pela empresa VALE, e dois artigos, (COUTINHO, 1976; PITOMBEIRA; MORAIS,1977), os quais forneceram a cota dos pontos onde os mapas fornecidos pela DHN não apresentaram dados. Para a produção desta grade, foram digitalizados aproximadamente 350.000 pontos de latitude, longitude e cota. A resolução espacial inicial foi gerada com 5 metros, a partir desta, a resolução foi degradada para 100 metros foram definidos os seguintes limites espaciais em graus decimais: latitude superior -2.2986, inferior -3.1099, longitude esquerda -43.7099 e direita -44.6889, a projeção é WGS 1984 e a zona 23s.

A interpolação dos dados foi realizada pelo método de Kriging, para cada ponto interpolado foram lidos, no mínimo, 8 pontos mais próximos e retirado suas médias. O raio de busca dos pontos foi de 10000 metros e em 8 direções diferentes, e com 8 dados por setor pesquisado.

Os dados foram exportados para um arquivo ascii, para que possibilitar a leitura em outras plataformas computacionais.

Na Figura 13, pode-se observar uma representação da malha produzida.

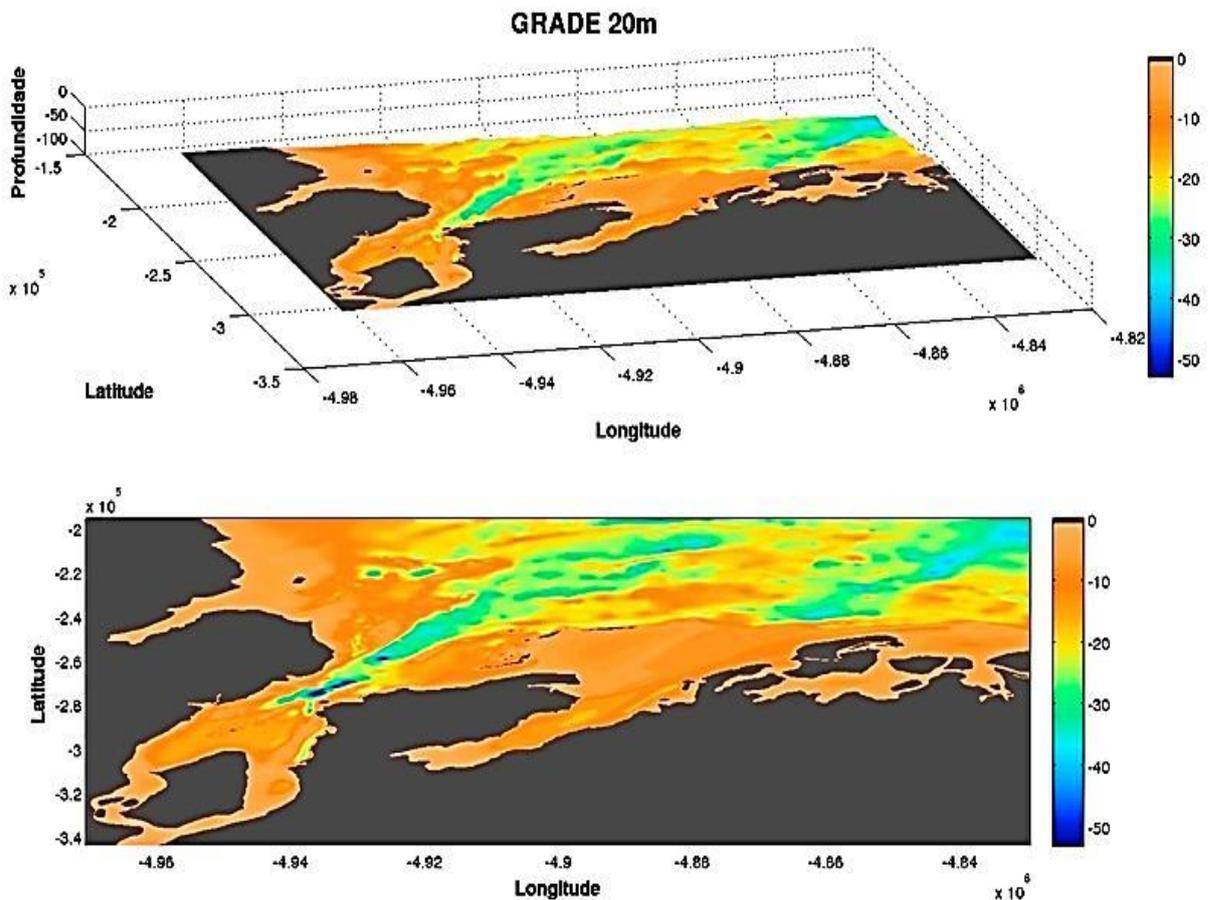


Figura 13 - Representação da grade gerada.

3.2.3. Modelagem hidrodinâmica

O modelo hidrodinâmico foi desenvolvido no Laboratório de Hidrodinâmica Costeira e Estuarina - LHiCEAI da Universidade Federal do Maranhão. As equações governantes são baseadas na formulação proposta por Casulli; Cheng, (1992) e são:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \gamma \tau \frac{(Ua-U)}{H} - g \frac{\sqrt{U^2+V^2}}{Cz^2H} U + fV$$

Eq. 8

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \gamma_\tau \frac{(Va - V)}{H} - g \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{Cz^2 H} V - fU$$

Onde o primeiro termo é a variação local, os dois próximos são os termos advectivo e difusivos, após o sinal de igualdade temos o gradiente horizontal de pressão, seguido do termo de difusão turbulenta adicionado ao termo de cisalhamento superficial do vento, o penúltimo é a subtração da velocidade com o cisalhamento no assoalho, o último é o efeito de Coriolis.

Devido ao atrito com o assoalho e o efeito do vento na superfície, as velocidades médias do fluido variam, onde \mathbf{U} e \mathbf{V} são as suas médias em profundidade, sendo assim temos a variação desta forçante no topo:

$$v \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma_t (Ua - U), \text{ e } v \frac{\partial v}{\partial z} = \gamma_t (Va - V) \quad \text{Eq. 9}$$

e no fundo:

$$v \frac{\partial u}{\partial z} = g \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{Cz^2 H} U, \text{ e } v \frac{\partial v}{\partial z} = g \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{Cz^2 H} V \quad \text{Eq. 10}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0$$

Como $H = \eta + h$, onde h é a profundidade e η é a variação da superfície livre, temos então:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{(\eta + h)\partial(U)}{\partial x} + \frac{U\partial(\eta)}{\partial x} + \frac{U\partial(h)}{\partial x} + \frac{(\eta + h)\partial(V)}{\partial y} + \frac{V\partial(\eta)}{\partial y} + \frac{V\partial(h)}{\partial y} = 0 \quad \text{Eq. 11}$$

Distretizando em diferenças finitas para ambientes bem misturados, avançado no tempo e centrado no espaço, para as seguintes direções:

Zonal:

$$\begin{aligned}
& \frac{U_{ij}^{n+1} - U_{ij}^n}{\delta t} + U_{ij}^n \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i-1,j}^n}{2\delta x} + V_{ij}^n \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j-1}^n}{2\delta y} \\
& = -g \frac{\eta_{i+1,j}^n - \eta_{i-1,j}^n}{2\delta x} + \varepsilon \left(\frac{U_{i+1,j}^n - 2U_{ij}^n + U_{i-1,j}^n}{\delta x^2} + \frac{U_{i,j+1}^n - 2U_{ij}^n + U_{i,j-1}^n}{\delta y^2} \right) \\
& + \gamma_\tau \frac{(U a_{ij}^n - U_{ij}^n)}{H_{ij}} - g \frac{\sqrt{U_{ij}^2 + V_{ij}^2}}{Cz_{ij}^2(\eta_{ij}^n + h_{ij})} U_{ij}^n + fV_{ij}^n \\
U_{ij}^{n+1} & = -U_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (U_{i+1,j}^n - U_{i-1,j}^n) - V_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (U_{i,j+1}^n - U_{i,j-1}^n) - g \frac{\delta t}{2\delta x} (\eta_{i+1,j}^n - \eta_{i-1,j}^n) \\
& + \frac{\delta t}{\delta x^2} \varepsilon (U_{i+1,j}^n - 2U_{ij}^n + U_{i-1,j}^n) + \frac{\delta t}{\delta y^2} \varepsilon (U_{i,j+1}^n - 2U_{ij}^n + U_{i,j-1}^n) \\
& + \frac{\delta t \gamma_\tau}{H_{ij}} (U a_{ij}^n - U_{ij}^n) - \frac{\delta t g}{Cz_{ij}^2(\eta_{ij}^n + h_{ij})} U_{ij}^n \sqrt{U_{ij}^2 + V_{ij}^2} + \delta t f V_{ij}^n + U_{ij}^n
\end{aligned}$$

Para a direção meridional:

$$\begin{aligned}
& \frac{V_{ij}^{n+1} - V_{ij}^n}{\delta t} + U_{ij}^n \frac{V_{i+1,j}^n - V_{i-1,j}^n}{2\delta x} + V_{ij}^n \frac{V_{i,j+1}^n - V_{i,j-1}^n}{2\delta y} \\
& = -g \frac{\eta_{i,j+1}^n - \eta_{i,j-1}^n}{2\delta y} + \varepsilon \left(\frac{V_{i+1,j}^n - 2V_{ij}^n + V_{i-1,j}^n}{\delta x^2} + \frac{V_{i,j+1}^n - 2V_{ij}^n + V_{i,j-1}^n}{\delta y^2} \right) + \\
& \gamma_\tau \frac{(V a_{ij}^n - V_{ij}^n)}{H_{ij}} - g \frac{\sqrt{U_{ij}^2 + V_{ij}^2}}{Cz_{ij}^2(\eta_{ij}^n + h_{ij})} V_{ij}^n - fU_{ij}^n \\
V_{ij}^{n+1} & = -U_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (V_{i+1,j}^n - V_{i-1,j}^n) - V_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (V_{i,j+1}^n - V_{i,j-1}^n) - g \frac{\delta t}{2\delta y} (\eta_{i,j+1}^n - \eta_{i,j-1}^n) \\
& + \frac{\delta t}{\delta x^2} \varepsilon (V_{i+1,j}^n - 2V_{ij}^n + V_{i-1,j}^n) + \frac{\delta t}{\delta y^2} \varepsilon (V_{i,j+1}^n - 2V_{ij}^n + V_{i,j-1}^n) \\
& + \frac{\delta t}{H_{ij}} \gamma_\tau (V a_{ij}^n - V_{ij}^n) - g \frac{\delta t}{Cz_{ij}^2(\eta_{ij}^n + h_{ij})} \sqrt{U_{ij}^2 + V_{ij}^2} V_{ij}^n - \delta t f U_{ij}^n + V_{ij}^n
\end{aligned}$$

Discretizando para a Superfície livre:

$$\begin{aligned} \frac{\eta_{ij}^{n+1} - \eta_{ij}^n}{\delta t} + (\eta_{ij}^n + h_{ij}^n) \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i-1,j}^n}{2\delta x} + U_{ij}^n \frac{\eta_{i+1}^n - \eta_{i-1}^n}{2\delta x} + U_{ij}^n \frac{h_{i+1,j}^n - h_{i-1,j}^n}{2\delta x} \\ + (\eta_{ij}^n + h_{ij}^n) \frac{V_{ij+1}^n - V_{ij-1}^n}{2\delta y} + V_{ij}^n \frac{\eta_{ij+1}^n - \eta_{ij-1}^n}{2\delta y} + V_{ij}^n \frac{h_{ij+1}^n - h_{ij-1}^n}{2\delta y} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{ij}^{n+1} = -\frac{\delta t}{2\delta x} (\eta_{ij}^n + h_{ij}^n) (U_{i+1,j}^n - U_{i-1,j}^n) - U_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (\eta_{i+1}^n - \eta_{i-1}^n) \\ - U_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (h_{i+1,j}^n - h_{i-1,j}^n) - \frac{\delta t}{2\delta y} (\eta_{ij}^n + h_{ij}^n) (V_{ij+1}^n - V_{ij-1}^n) \\ - V_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (\eta_{ij+1}^n - \eta_{ij-1}^n) - V_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (h_{ij+1}^n - h_{ij-1}^n) + \eta_{ij}^n \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{ij}^{n+1} = -\frac{\delta t}{2\delta x} (\eta_{ij}^n + h_{ij}^n) (U_{i+1,j}^n - U_{i-1,j}^n) - U_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (\eta_{i+1}^n - \eta_{i-1}^n + h_{i+1,j}^n - h_{i-1,j}^n) \\ - \frac{\delta t}{2\delta y} (\eta_{ij}^n + h_{ij}^n) (V_{ij+1}^n - V_{ij-1}^n) \\ - V_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (\eta_{ij+1}^n - \eta_{ij-1}^n + h_{ij+1}^n - h_{ij-1}^n) + \eta_{ij}^n \end{aligned}$$

Para melhorar o esquema numérico, foi utilizado o método proposto por Leonard (1969), para o calcular o transporte advectivo para uma variável genérica (φ) nas equações temos:

Considerando \mathbf{U} maior ou igual a zero:

$$-U_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (\varphi_{i-2,j}^n - 6. \varphi_{i-1,j}^n + 3. \varphi_{ij}^n - \varphi_{i+1,j}^n)$$

Eq. 15

Com \mathbf{U} menor que zero:

$$-U_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (-2. \varphi_{i-1,j}^n - 3. \varphi_{ij}^n + 6. \varphi_{i+1,j}^n - \varphi_{i+2,j}^n)$$

Eq. 16

Considerando \mathbf{V} maior ou igual a zero:

$$-V_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (\varphi_{ij-2}^n - 6. \varphi_{ij-1}^n + 3. \varphi_{ij}^n - \varphi_{ij+1}^n)$$

Eq. 17

Com \mathbf{V} menor que zero:

Eq. 18

$$-V_{ij}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (-2 \cdot \varphi_{i,j-1}^n - 3 \cdot \varphi_{i,j}^n + 6 \cdot \varphi_{i,j+1}^n - \varphi_{i,j+2}^n)$$

Para as soluções no tempo, foi utilizado um filtro para o tratamento dos dados, este método foi proposto por Asselin (1972), onde:

Eq. 19

$$\overline{\varphi_{ij}^n} = \varphi_{ij}^n + 0.5\nu[\varphi_{ij}^{n-1} - 2\varphi_{ij}^n + \varphi_{ij}^{n+1}]$$

3.2.4. Modelo de transporte

O modelo de transporte calcula o quantitativo transportado de uma determinada variável. Para a determinação do transporte de uma substância presente em qualquer massa, para tal usa-se o princípio da conservação de massa. Este princípio nos dá a possibilidade de simular as movimentações presentes no interior de qualquer volume (ROSMAN, 1977).

A dispersão de constituintes em corpos d'água é um processo complexo, pois é resultante de diversas variáveis, podendo ser definido em dois tipos de movimentos, o resolvível (que pode ser observado e medido na escala de interesse) chamado advectivo, e o não resolvível (que deve ser modelado a partir de variáveis medidas na escala resolvível) chamado difusivo (ROSMAN, 1977).

O modelo de transporte é fundamentado nas equações de advecção e difusão proposto por Zhang (2007). É suposto que um constituinte transportado não impacta o escoamento, dessa forma, podemos desacoplar o transporte do constituinte da modelagem hidrodinâmica do movimento do fluido.

Considerando a forte mistura do CESH, e também, supondo que o transporte horizontal não discrimina material transportado, podemos reescrever equação governante, a saber:

$$\frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial y} - \int \left(\mathbf{w}_s \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) d\phi = k_x \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial y^2}, \quad \text{Eq. 20}$$

Neste algoritmo a equação de transporte advectivo difusivo é resolvida utilizando-se um esquema numérico de diferenças finitas envolvendo Euler Forward para o tempo e centrado para o espaço. Depois foi aplicado o esquema CUICKEST

(Cubic Upstream Interpolation for Convective Kinematics with Estimated Stream Term) para os termos advectivos.

A difusão turbulenta é considerada isotrópica sendo parametrizada segundo a formulação de Smagorinsky (EZER; MELLOR, 1994).

$$\frac{\varphi_{i,j}^{n+1} - \varphi_{i,j}^n}{\delta t} + U_{i,j}^n \frac{\varphi_{i+1,j}^n - \varphi_{i-1,j}^n}{2\delta x} + V_{i,j}^n \frac{\varphi_{i,j+1}^n - \varphi_{i,j-1}^n}{2\delta y} - \sum_{\phi} \left(w_s \frac{\partial \varphi_{\phi}}{\partial z} \right) \delta \phi = k_x \left(\frac{\varphi_{i+1,j}^n - 2\varphi_{i,j}^n + \varphi_{i-1,j}^n}{\delta x^2} \right) + k_y \left(\frac{\varphi_{i,j+1}^n - 2\varphi_{i,j}^n + \varphi_{i,j-1}^n}{\delta y^2} \right), \quad \text{Eq. 21}$$

Aplicando o esquema de Leonard (CUICKEST) aos termos advectivo teremos:
Para \mathbf{U} maior ou igual a zero:

$$-U_{i,j}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (\varphi_{i-2,j}^n - 6\varphi_{i-1,j}^n + 3\varphi_{i,j}^n - \varphi_{i+1,j}^n), \quad \text{Eq. 22}$$

Tomando \mathbf{U} menor que zero:

$$-U_{i,j}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (-2\varphi_{i-1,j}^n - 3\varphi_{i,j}^n + 6\varphi_{i+1,j}^n - \varphi_{i+2,j}^n), \quad \text{Eq. 23}$$

Considerando \mathbf{V} maior ou igual a zero:

$$-V_{i,j}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (\varphi_{i,j-2}^n - 6\varphi_{i,j-1}^n + 3\varphi_{i,j}^n - \varphi_{i,j+1}^n), \quad \text{Eq. 24}$$

Para \mathbf{V} menor que zero:

$$-V_{i,j}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (-2\varphi_{i,j-1}^n - 3\varphi_{i,j}^n + 6\varphi_{i,j+1}^n - \varphi_{i,j+2}^n), \quad \text{Eq. 25}$$

Assim podemos representar os termos advectivos da seguinte forma:

$$\varphi_{i,j}^{n+1} = - \begin{cases} -U_{i,j}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (-2\varphi_{i-1,j}^n - 3\varphi_{i,j}^n + 6\varphi_{i+1,j}^n - \varphi_{i+2,j}^n), & \mathbf{U} < 0 \\ -U_{i,j}^n \frac{\delta t}{2\delta x} (\varphi_{i-2,j}^n - 6\varphi_{i-1,j}^n + 3\varphi_{i,j}^n - \varphi_{i+1,j}^n), & \mathbf{U} \geq 0 \end{cases} - \begin{cases} -V_{i,j}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (-2\varphi_{i,j-1}^n - 3\varphi_{i,j}^n + 6\varphi_{i,j+1}^n - \varphi_{i,j+2}^n), & \mathbf{V} < 0 \\ -V_{i,j}^n \frac{\delta t}{2\delta y} (\varphi_{i,j-2}^n - 6\varphi_{i,j-1}^n + 3\varphi_{i,j}^n - \varphi_{i,j+1}^n), & \mathbf{V} \geq 0 \end{cases} + \delta t \sum_{\phi} \left(w_s \frac{\partial \varphi_{\phi}}{\partial z} \right) \delta \phi -$$

$$k_x \frac{\delta t}{\delta x^2} (\varphi_{i+1,j}^n - 2\varphi_{i,j}^n + \varphi_{i-1,j}^n) - k_y \frac{\delta t}{\delta y^2} (\varphi_{i,j+1}^n - 2\varphi_{i,j}^n + \varphi_{i,j-1}^n) + \varphi_{i,j}^n \quad ,$$

Eq. 26

Equitativamente ao modelo de hidráulica, ao final de cada passo de tempo será aplicado o filtro proposto por Asselin (1972), a saber:

$$\overline{\varphi_{i,j}^n} = \varphi_{i,j}^n + 0.5\nu[\varphi_{i,j}^{n-1} - 2\varphi_{i,j}^n + \varphi_{i,j}^{n+1}] \quad ,$$

Eq. 27

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CORRENTES

As correntes variam fundamentalmente em função da maré, apresentam ainda uma pequena influência da vazão dos rios, essas variações no campo de velocidade em todo período de estudo ocorrem em regimes hídricos diferenciados Tabela 3, a média de velocidade m.s^{-1} nas campanhas no período seco (junho e setembro), com velocidades máximas a $3,03 \text{ m.s}^{-1}$, e mínimas menores que $0,004 \text{ m.s}^{-1}$. No período chuvoso, de novembro e março, o campo de velocidades chega a ser 254% maior em determinados locais, evidenciando máximas de $4,53 \text{ m.s}^{-1}$ na seção 03, e mínimas de $3,48 \text{ m.s}^{-1}$ na Seção 2.

Os valores obtidos são elevados mesmo para o padrão de macro maré observados em outras localidades. Valores obtidos da literatura (FISHER et al., 1979; PEREIRA; WAINER, 2014; AMARAL; ALFREDINI, 2010; BÖCK; ASSAD; LANDAU, 2010), não ultrapassam $2,60 \text{ m.s}^{-1}$, cerca de 45% mais fraca que a máxima obtida neste trabalho. Na figura 14, estão representadas vetorialmente as velocidades nas seções, incluindo a máxima observada.

Tabela 3 - Representação da velocidade das correntes, nos períodos seco e chuvoso.

	PERCURSO	VELOCIDADE TOTAL (m.s ⁻¹)		
		MAXIMA	MÉDIA	MINIMA
SECO	SEÇÃO - 01	1,656	0,0562	0,007
	SEÇÃO - 02	2,768	0,0983	0,04
	SEÇÃO - 03	3,036	0,0452	0,011
	SEÇÃO - 04	2,578	0,0653	0,011
CHUVOSO	SEÇÃO - 01	4,206	0,1172	0,007
	SEÇÃO - 02	3,486	0,0972	0,013
	SEÇÃO - 03	4,538	0,1057	0,007
	SEÇÃO - 04	4,423	0,1187	0,011

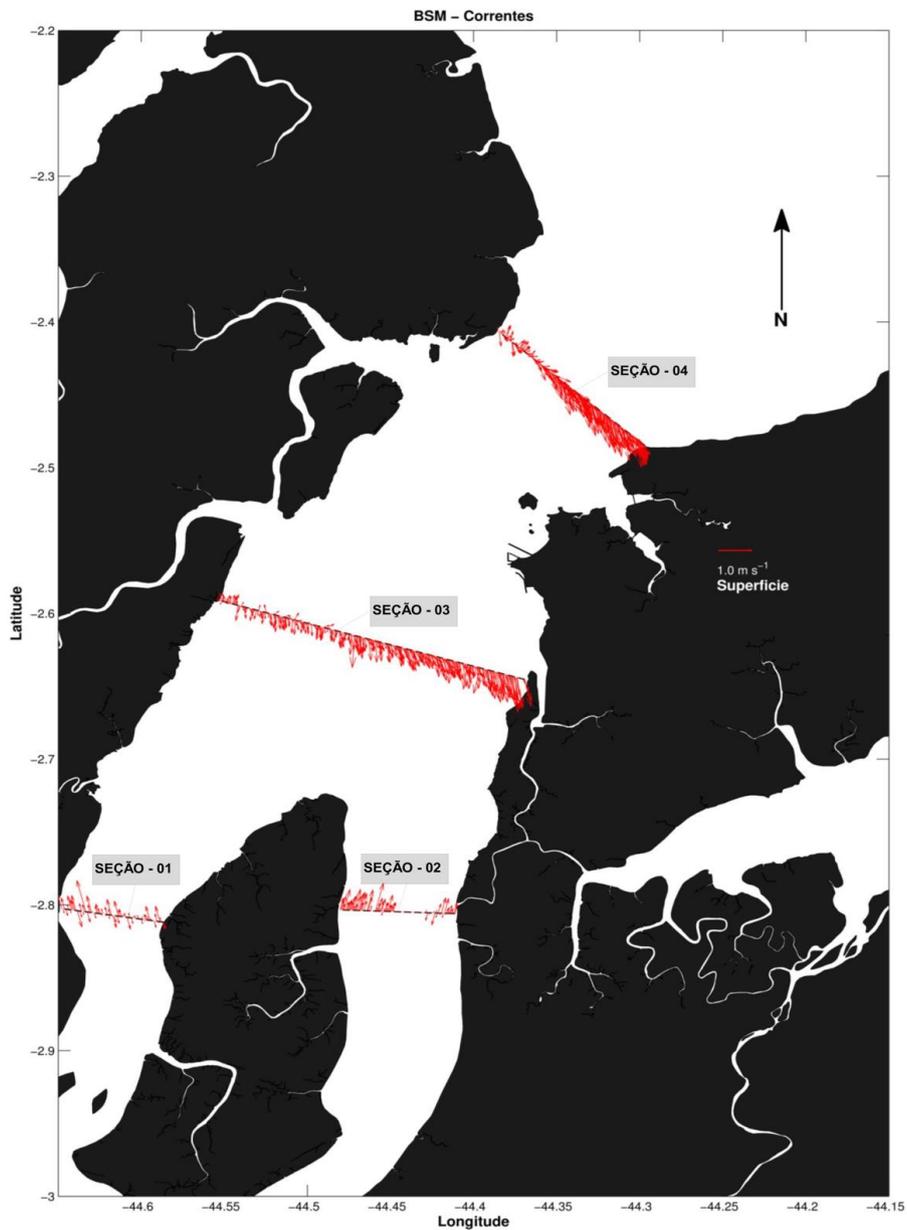


Figura 14 - Representação vetorial da velocidade das correntes.

4.2. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ICTIOPLÂNCTON

Nas três primeiras campanhas realizadas, houve um comportamento similar para a distribuição da comunidade ictioplanctônica, sendo bem clara uma maior concentração nas regiões onde há diminuição nas velocidades do fluido, resultando na diminuição da velocidade principalmente no meio do complexo estuarino Seção 03 onde começa o aprofundamento do canal de acesso.

Em novembro de 2014, início do período chuvoso, as maiores concentrações do ictioplâncton foram encontradas mais próximas a margem direita do complexo estuarino, com valores da concentração chegando a 1100 indivíduos por 100 m³.

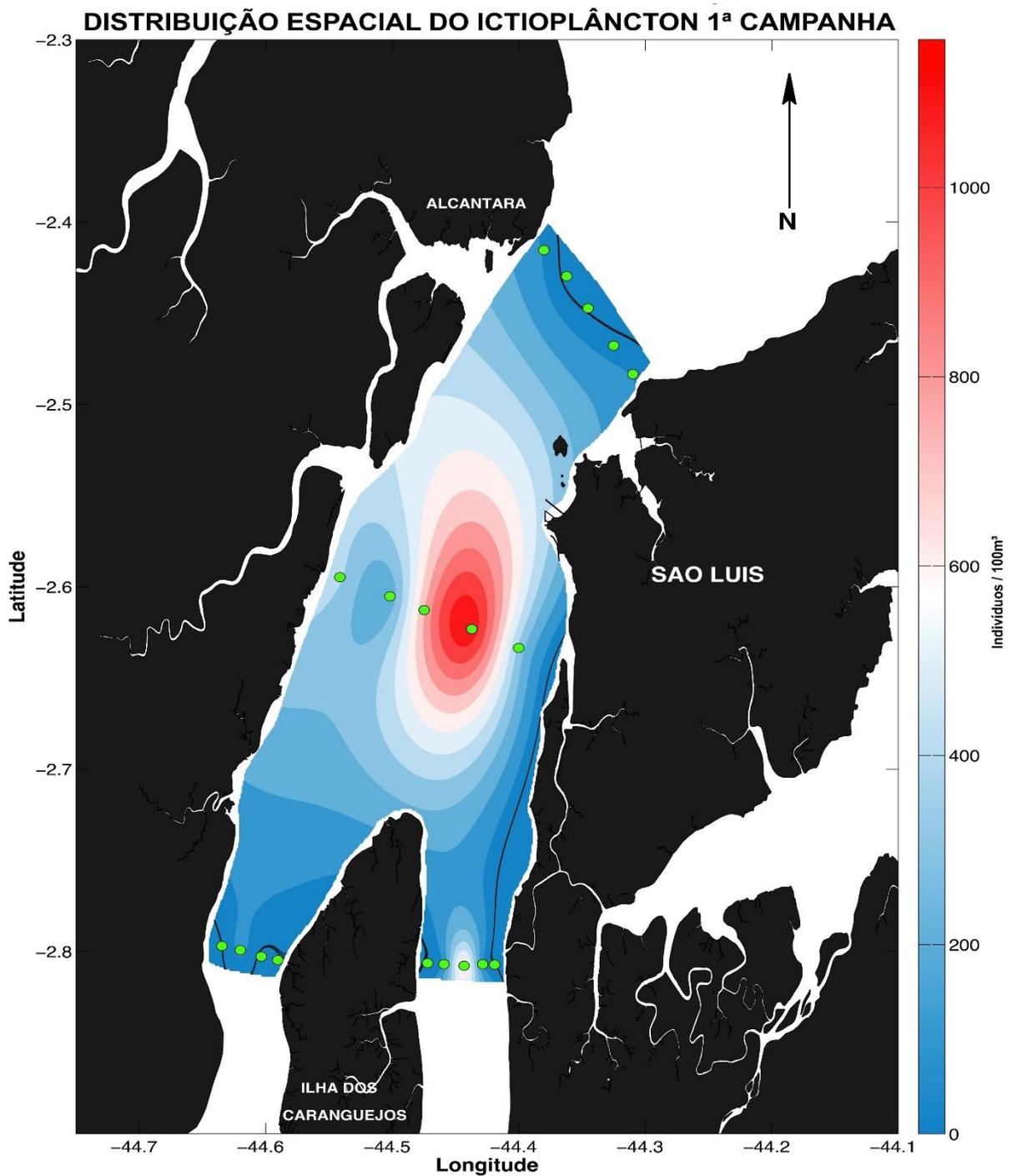


Figura 15 - Distribuição espacial do ictioplâncton no CSM, campanha de Novembro de 2014.

Na segunda campanha, março de 2015, a densidade de ictioplâncton por 100 m³, diminuiu relativamente, com máximas de 661 indivíduos por m³, esses valores são 30% menores que da campanha anterior. Nesta campanha, a concentração do ictioplâncton manteve-se próxima a margem direita do CSM.

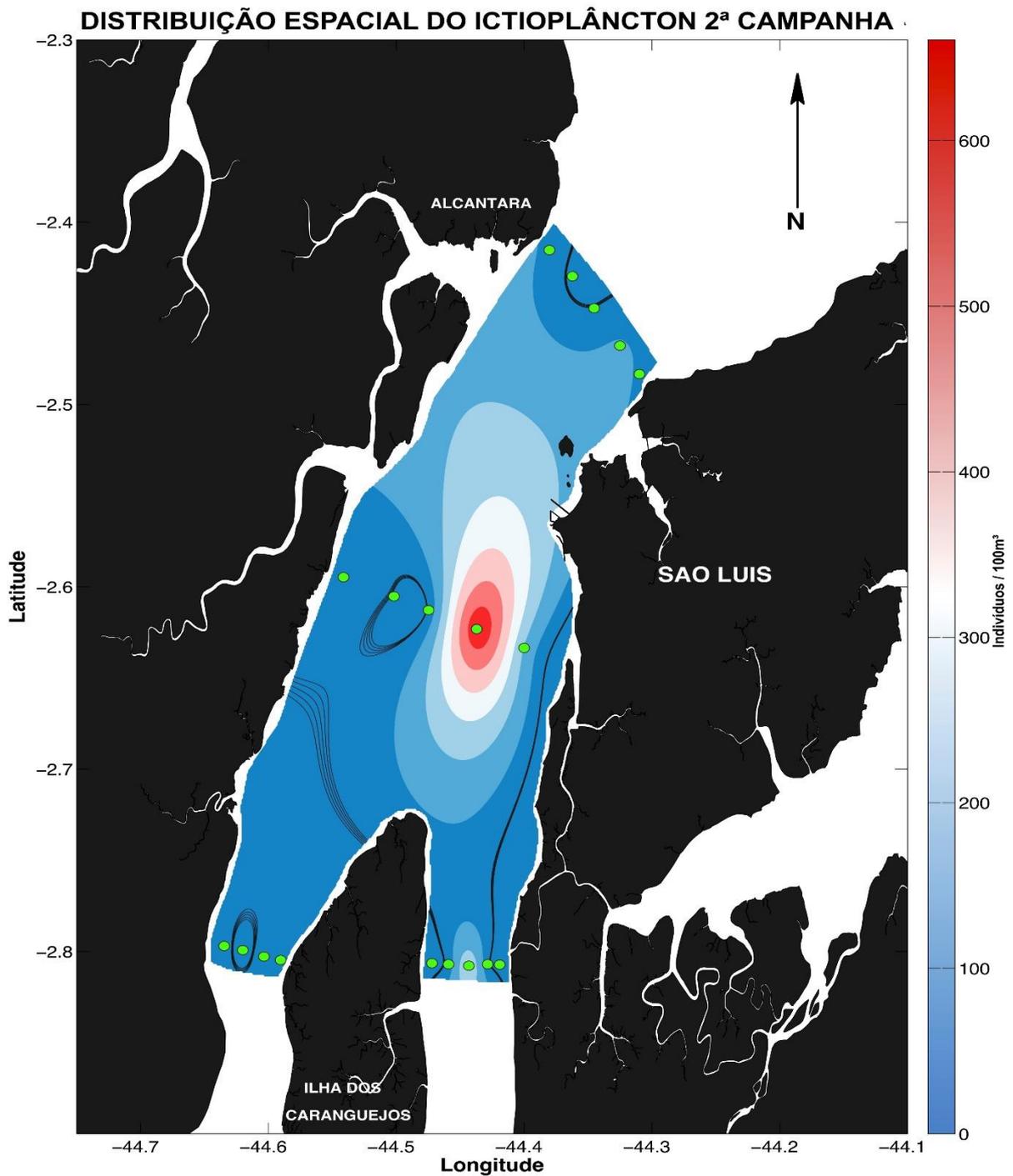


Figura 16 - Distribuição espacial do icteoplâncton no CESC, campanha de Março de 2015.

A terceira campanha já no início do período seco, apresenta uma concentração intermediária de icteoplâncton na região máxima de 906 indivíduos por m^3 , valor 17% menor que a primeira campanha e 27% superior a segunda campanha realizada, nota-se um reposicionamento da região de máxima concentração do icteoplâncton para o centro do CESC, fatores como maior velocidade dos ventos e a variação local do

campo de correntes, podem ter contribuído para tal fenômeno. Observa-se também que o deslocamento da máxima observada do ictioplâncton não se afasta do ponto de início do canal de acesso à região de estudo, corroborando com o conceito apresentado no início deste item.

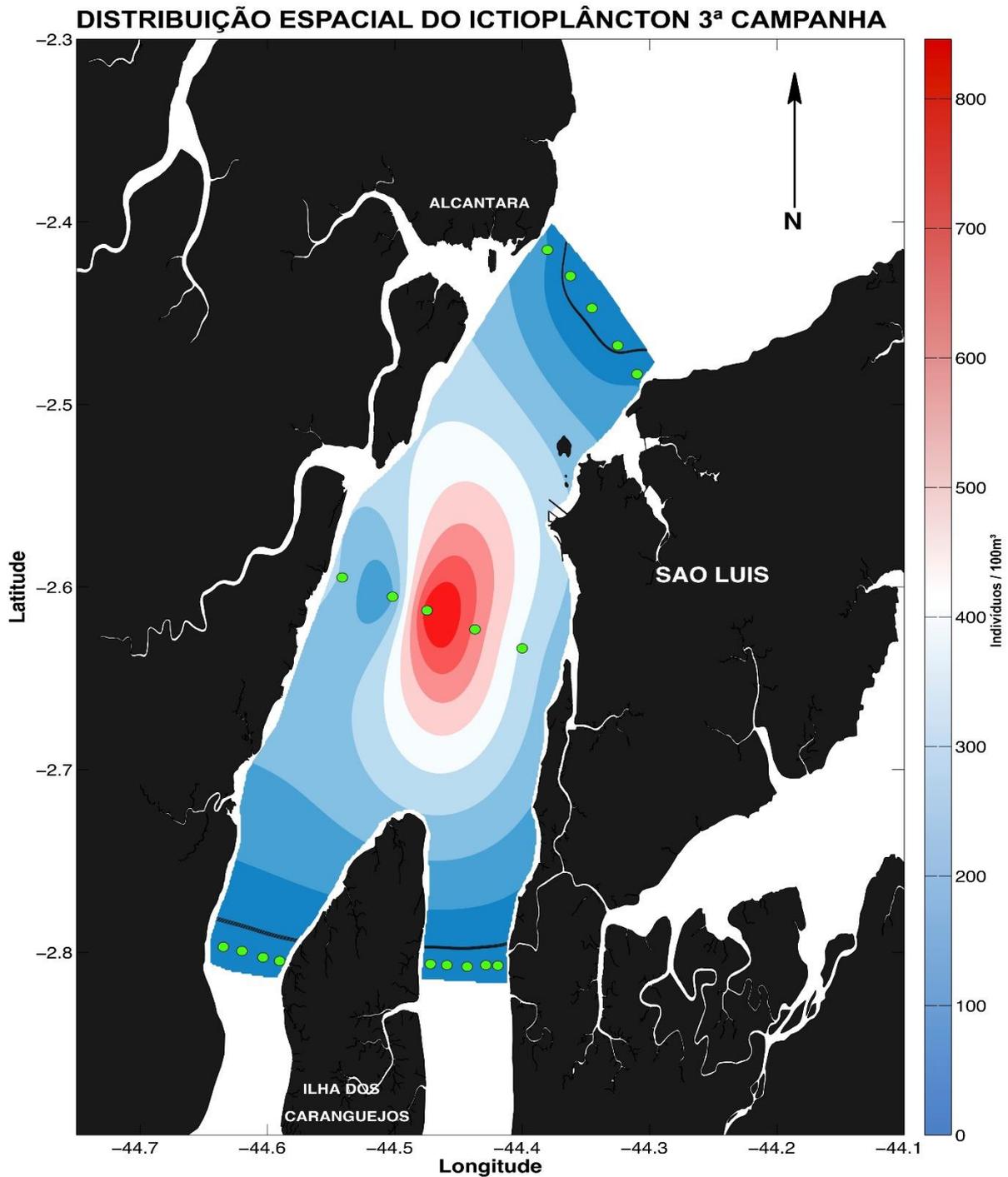


Figura 17 - Distribuição espacial do ictioplâncton no CSM, campanha de Junho de 2015.

Na última campanha, obteve-se um ponto de concentração diferente dos pontos já observados seguindo do ponto mais fundo da Seção 02 para o centro do complexo, observa-se também uma concentração maior na seção 04 na saída do CESM. Indicando assim que o deslocamento horizontal do ictioplâncton parte principalmente da Seção 02 onde a profundidade média é superior a Seção 01, ultrapassa toda a extensão do CESM e é carregado para fora do continente.

A densidade observada nesta última campanha foi a maior já observada, com máximas de 1727 indivíduos por 100 m³, cerca de 57% maior que a maior densidade encontrada até então.

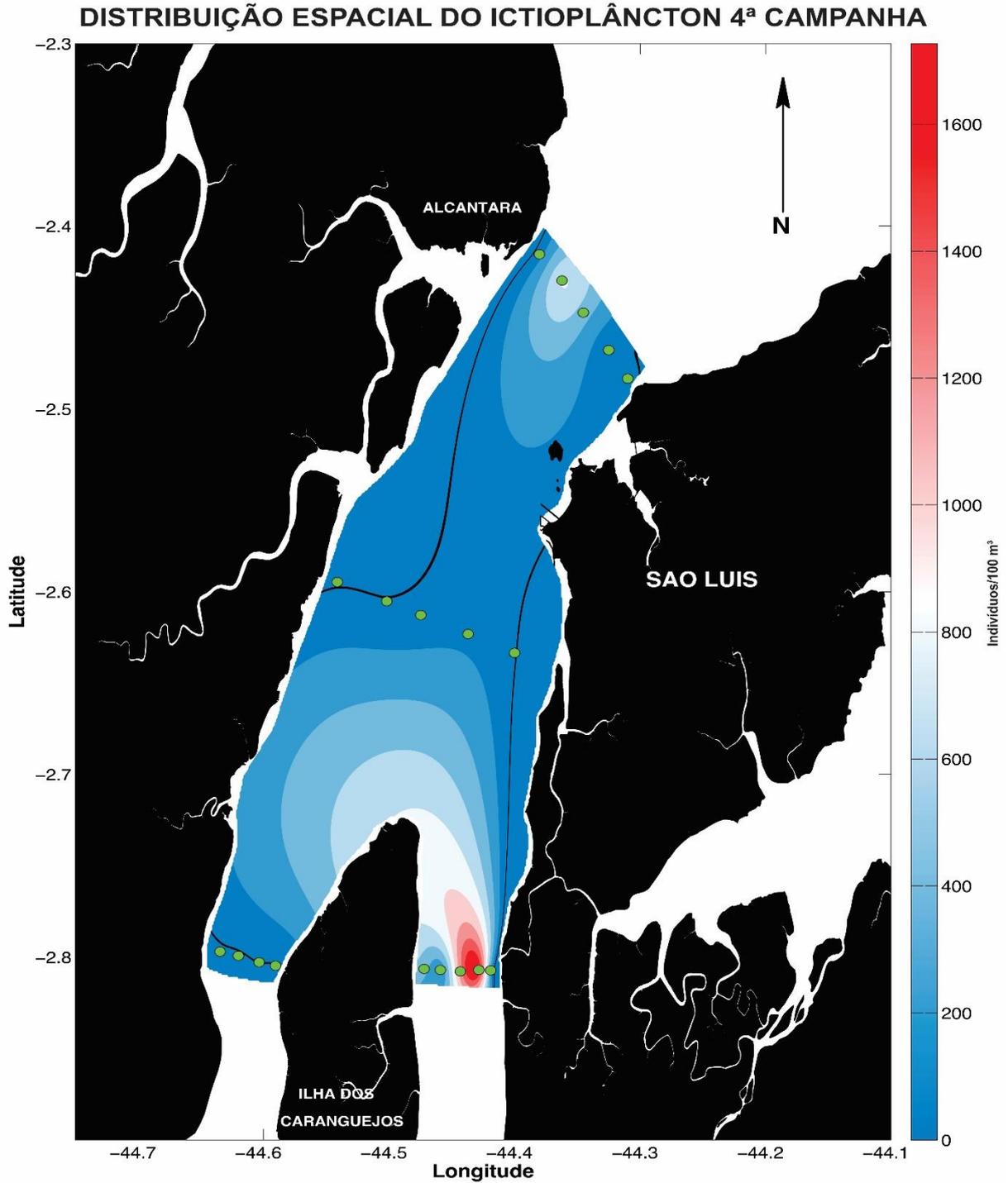


Figura 18 - Distribuição espacial do ictioplâncton no CSM, campanha de Setembro de 2015.

Em relação ao ponto de fundeio, pode-se observar um adensamento na concentração do ictioplâncton independente da fase da maré, sendo o mesmo ponto demonstrando valores de concentração descontínuos, indicando assim que o

transporte da comunidade ocorre em plumas e que estas são transportadas de forma não linear no CEM, Figura 19.

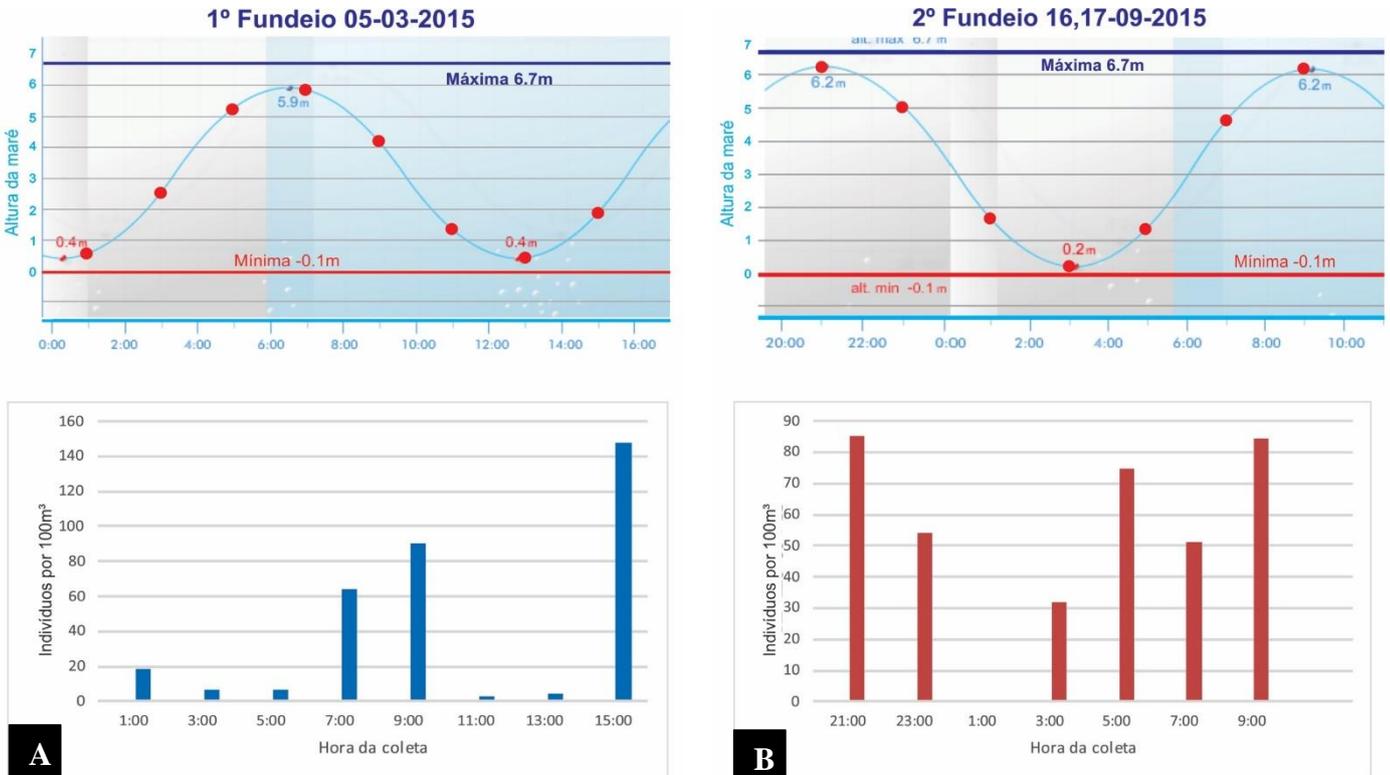


Figura 19 - Quantificação do ictioplâncton, A: Primeiro fundeio realizado no dia 05 de Março de 2015; B: Segundo fundeio, realizado nos dias 16 e 17 de Setembro de 2015.

4.3. EXPERIMENTO

O experimento utilizando a modelagem computacional, foi desenvolvido com o auxílio da equipe do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores da Universidade Federal do Maranhão, LHiCEAI-UFMA.

4.3.1. Calibração e Validação do Modelo de Hidráulica

A hidráulica foi trabalhada a partir dos dados observados, sendo utilizado como forçantes a maré e a descarga fluvial média. Fatores como resistência do fluido em relação ao assoalho, nível de redução e morfologia do terreno também foram levados em consideração.

O período de aquecimento do modelo (*Spinup*) foi de aproximadamente 5 dias, para tal foi levada em consideração a amplitude da maré e a vazão média do corpo hídrico adjacente, assim que observadas variações de 0.2 m.s^{-1} para a vazão do modelo, este foi considerado estável. A calibração do modelo consiste em um procedimento apresentado no esquema Figura 20:

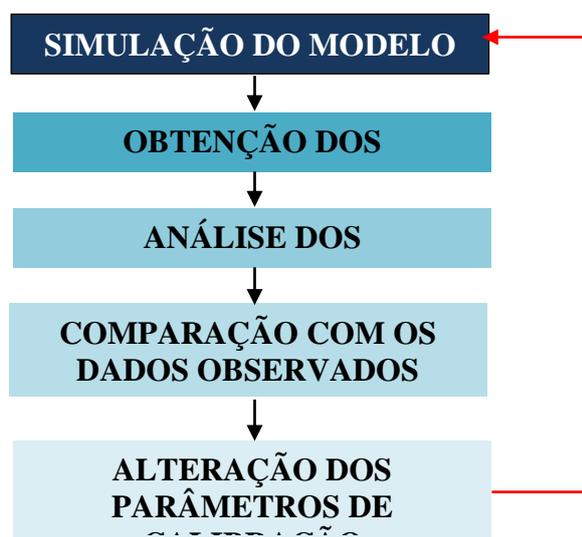


Figura 20 - Processo de calibração do modelo hidrodinâmico.

Para a validação de maré como dados independentes, o conjunto de dados gerados foi comparado a maré observada, para tal foram selecionados pontos na grade do modelo e paralelamente gráficos de amplitudes da maré, estes comparados com os dados aferidos que foram disponibilizados pela VALE, Figura 21. A partir desta fase, utilizou-se um skill de 30 dias (720 horas) de resultados da amplitude de maré (ETA) para as proximidades do Píer 4 da VALE onde se encontra o marégrafo que forneceu os dados para o modelo. Os dados da amplitude de maré gerados no modelo foram confrontados com o conjunto de dados observados Figura 22.

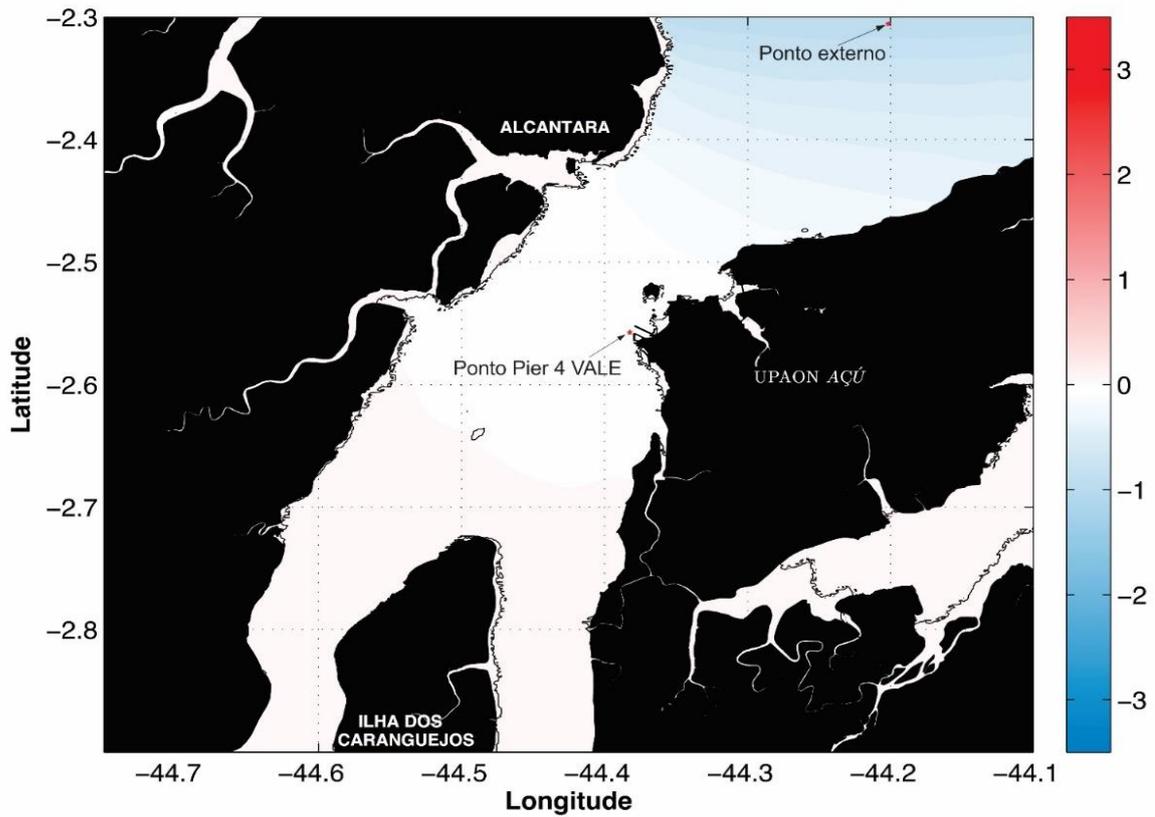


Figura 21 - Identificação dos pontos de análise da amplitude de maré.

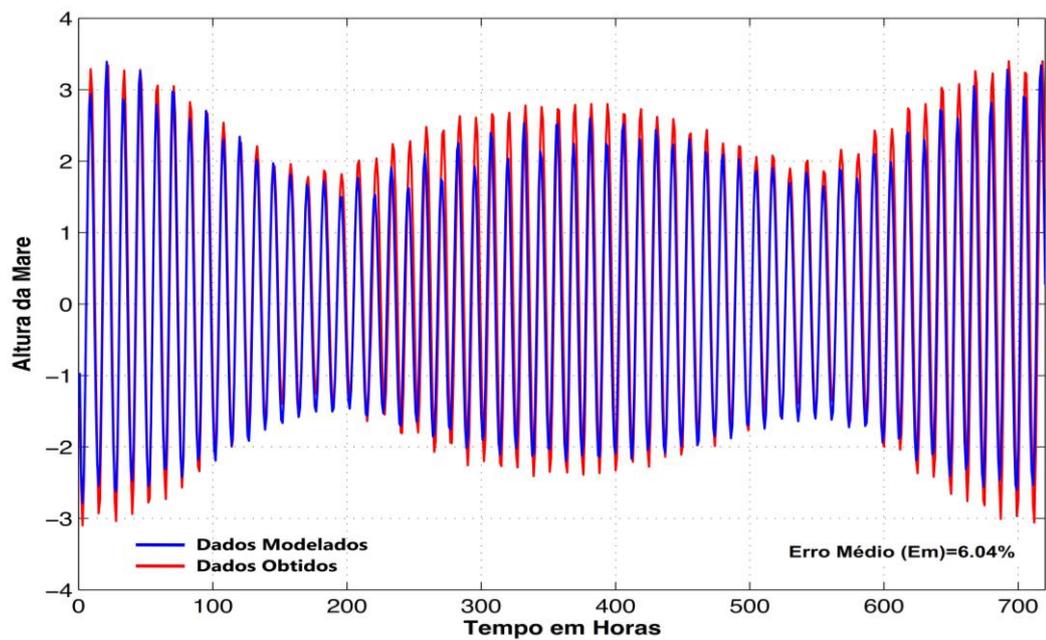


Figura 22 - Confronto da amplitude de maré obtida com maré modelada, para a região do Píer 4 da VALE.

Com os dados obtidos neste período, podemos observar amplitudes superiores a 3 metros para os dois parâmetros e erro médio próximos de 6% em relação a maré obtida. Não foram observadas diferenças significativas no comprimento de onda.

A propagação da onda de maré gerada pelo modelo pode ser observada na Figura 23, nesta está representada a onda de maré positiva (enchente) e negativa (vazante) se propagando no CESM. As forçantes resultantes desta onda governam todo o comportamento do corpo hídrico local. Os dados são representados com intervalo amostral de uma hora e compreendem um ciclo de maré.

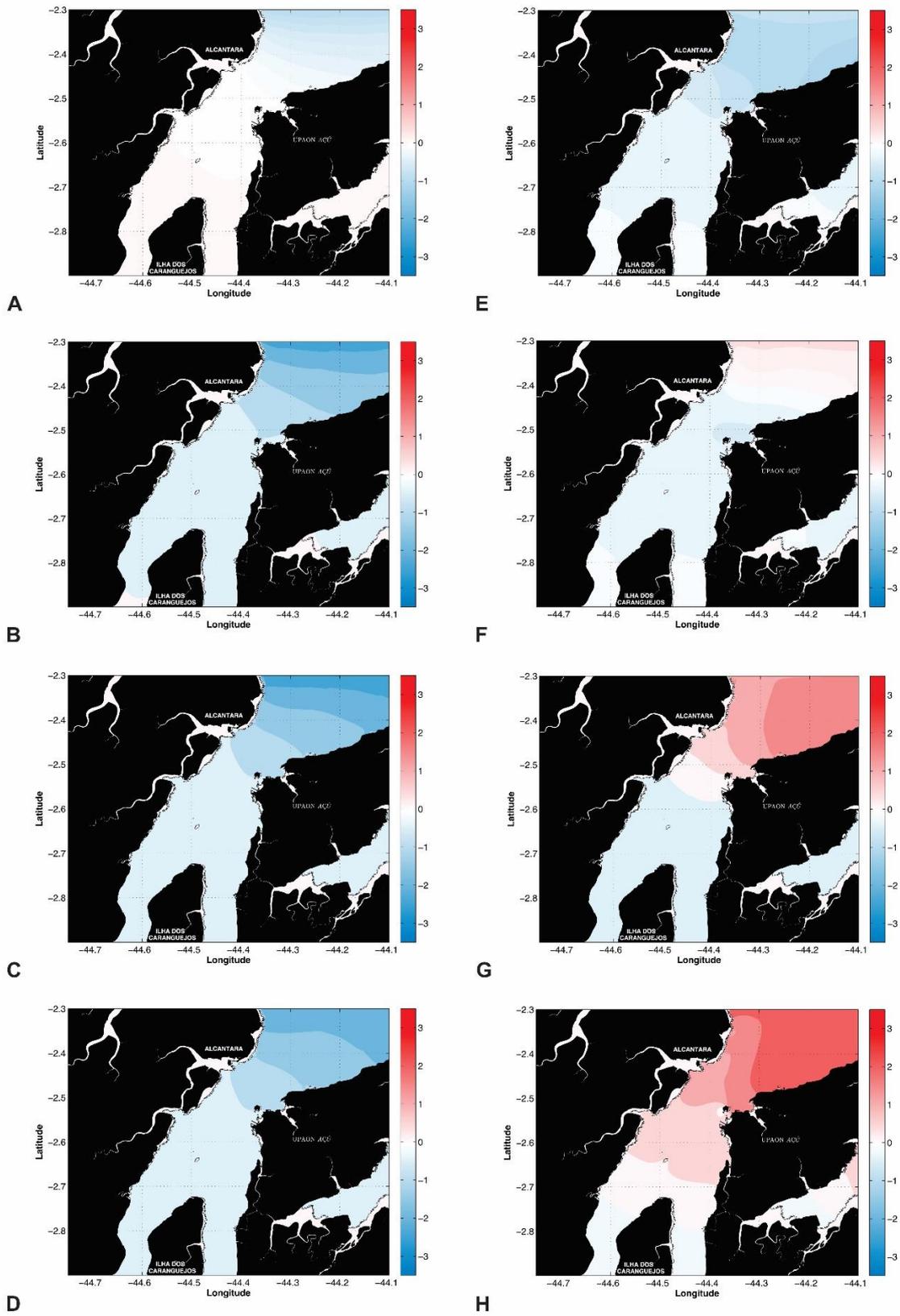


Figura 23 - Propagação da onda de maré no CESM; A, hora 01; B, hora 02; C, hora 03; D, hora 04; E, hora 05; F, hora 05; G, hora 08; H, hora 09.

4.3.2. Transporte de larvas

Com esta simulação pode-se compreender o espalhamento horizontal da pluma de ictioplâncton relacionada a atuação das forçantes do modelo de hidráulica na comunidade ictioplanctônica.

O modelo de transporte foi avaliado de duas fases partindo de um mesmo ponto de lançamento do ictioplâncton (fonte) Figura 24, a partir deste foram as forçantes do modelo de hidráulica que atuaram.

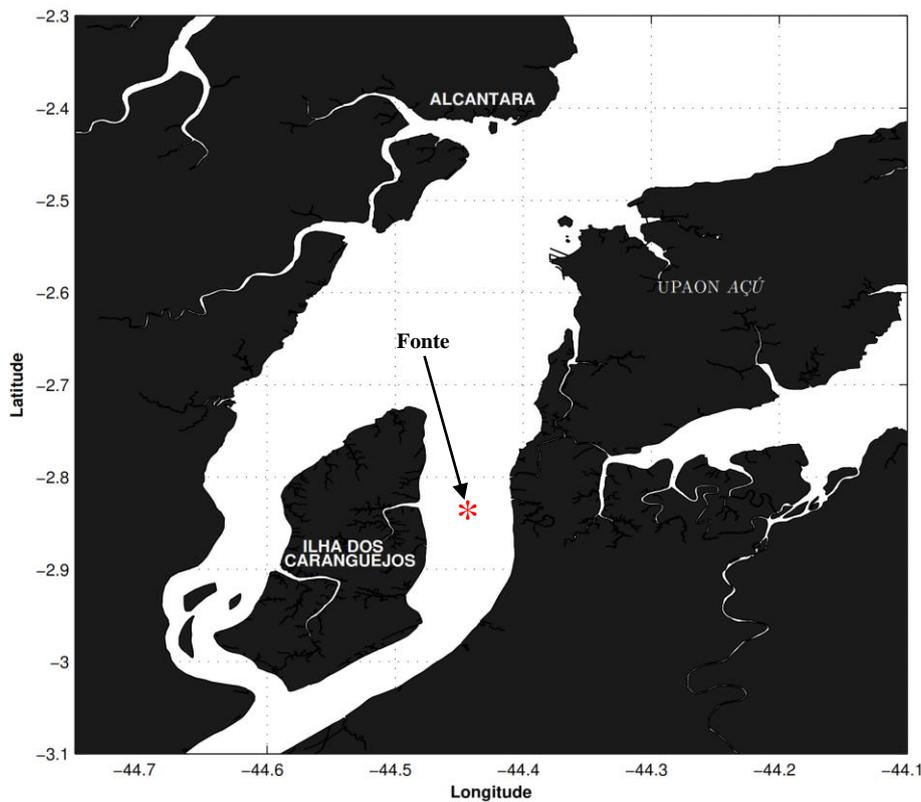


Figura 24 - Fonte de Ictioplâncton para o modelo de transporte.

A primeira fase foi iniciada após a adição da constituinte (fonte) onde foram geradas várias séries 12 horas modeladas em condições iniciais variáveis, na Figura 25 pode-se observar o resultado final da simulação onde a média percentual da probabilidade de propagação do ictioplâncton em várias direções é representada dentro do CESM.

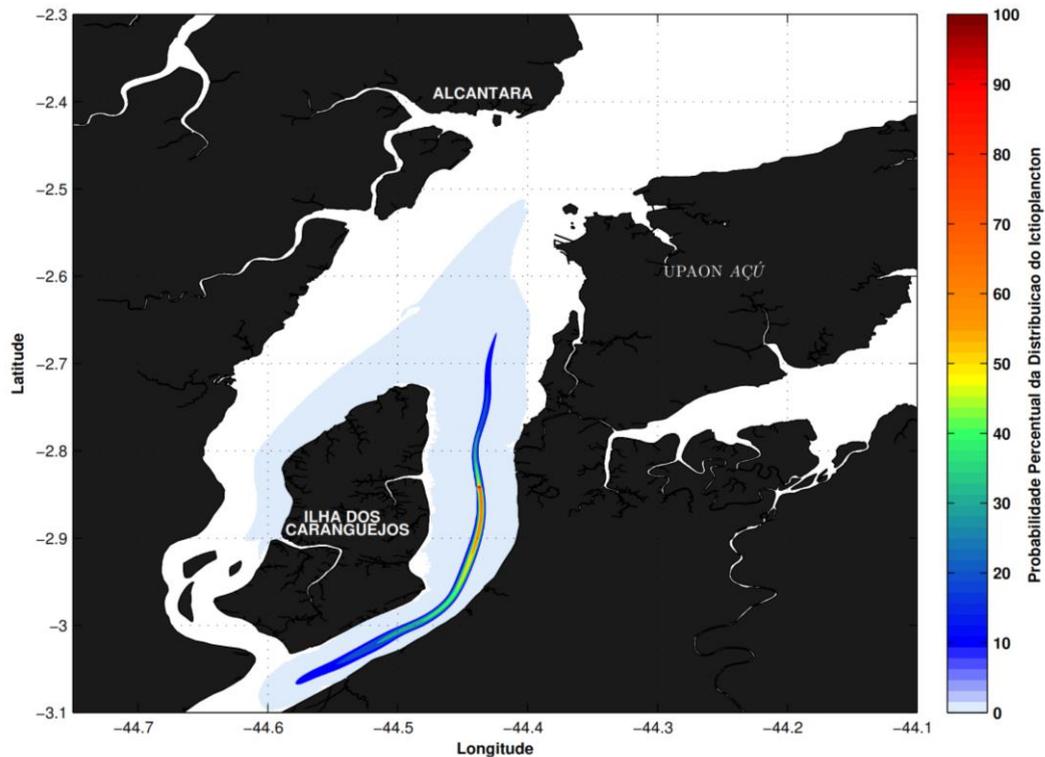
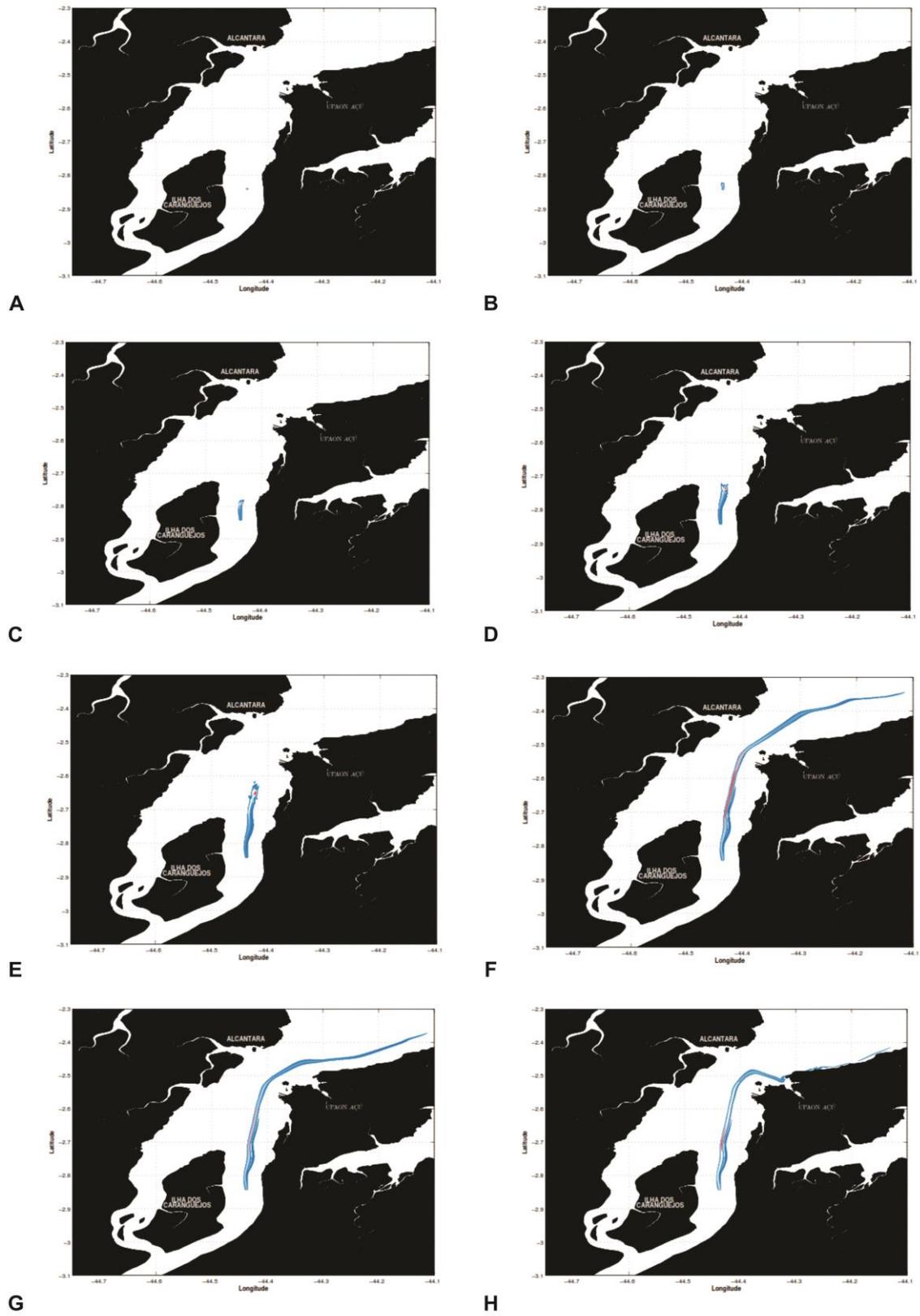


Figura 25 - Série de 12 horas amostrais para o transporte de Ictioplâncton.

Na segunda fase, foram gerados resultados do modelo para 5 dias, onde a pluma do ictioplâncton foi deslocada pelas forçantes do modelo de hidráulica por todo complexo estuarino. As figuras a seguir ilustram a probabilidade de deslocamento da pluma de ictioplâncton a cada 6 horas, a máxima da probabilidade é representada pelo vermelho.



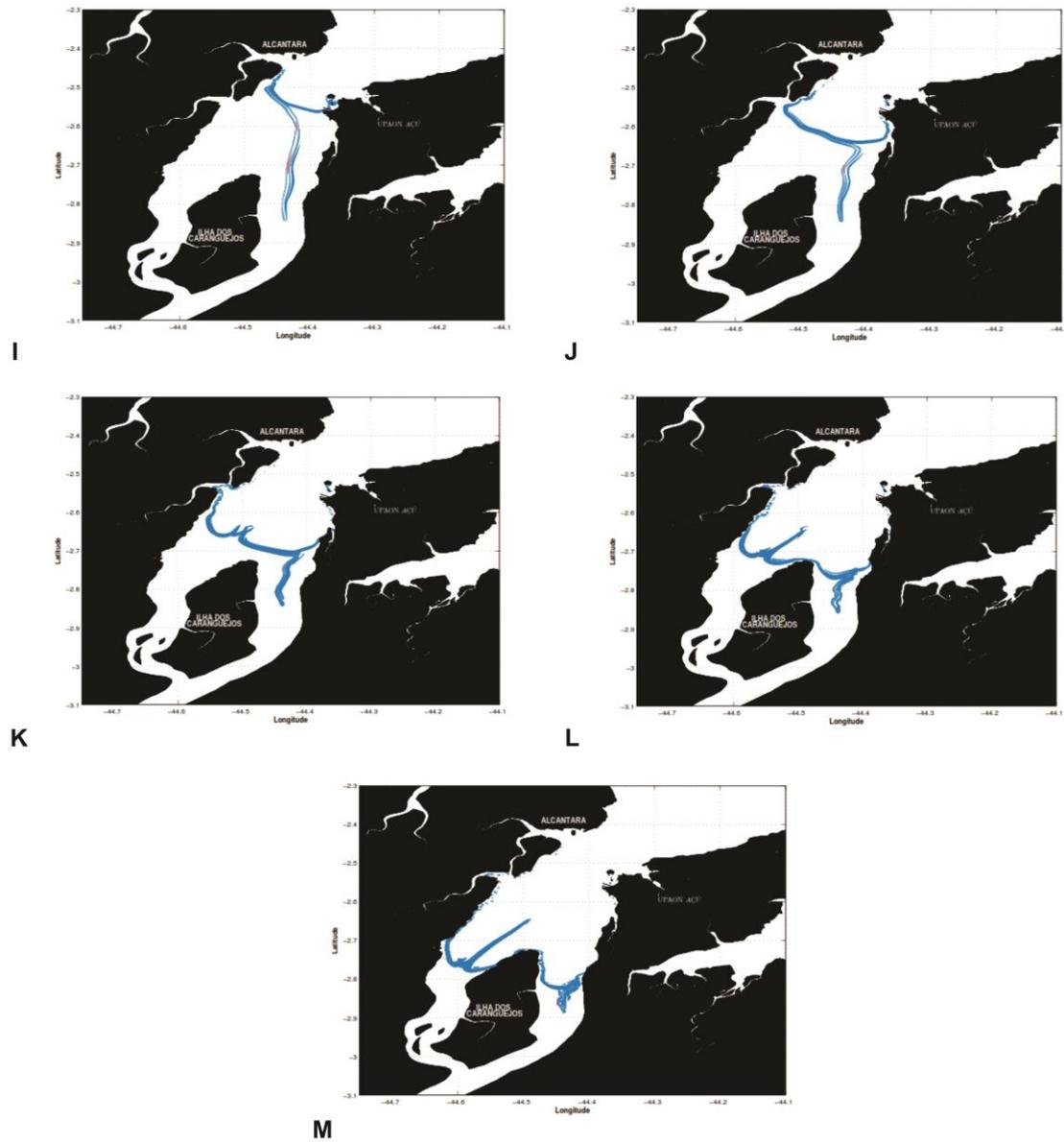


Figura 26 – Transporte de uma constituinte no CESM; A, Ponto inicial do modelo; B, Hora 10; C, Hora 20; D, Hora 30; E, Hora 40; F, Hora 50; G, Hora 60; H, Hora 70; I, Hora 80; J, Hora 90; K, Hora 100; L, Hora 110; M, Hora 120.

5. CONCLUSÕES

As velocidades das correntes na região de estudo é consideravelmente maior que em outros ambientes que apresentam as mesmas características e padrões de maré, sendo observados valores superiores a 4 m.s^{-1} no período chuvoso. Este padrão de velocidade não se repete para o período seco, onde o campo de velocidade se mantém próximo dos 3 m.s^{-1} .

A comunidade ictioplanctônica é passiva ao fluido, sendo carregado em todos os momentos pelas correntes. Entretanto, os padrões de sazonalidade e maré não parecem influenciar de forma significativa a concentração do ictioplâncton. No centro da Seção 03 e em áreas com maior profundidade foram observados maiores adensamentos desta comunidade, tal fato pode estar atrelado à desaceleração no campo de correntes em função do assoalho marinho, onde por conservação do movimento de massas, a velocidade tende a diminuir.

No fundeio realizado, foram observadas variações da pluma ictioplanctônica em todo o decorrer do experimento, tal situação pode estar associada ao transporte da comunidade ictioplanctônica durante os ciclos da maré.

O ajuste do modelo hidráulico foi satisfatório, onde as variações de maré e seus ciclos foram reproduzidos de forma equivalente aos dados observados. Com erro médio na amplitude próximo a 6% e propagação das ondas de maré bem representadas, podemos então sugerir que o modelo gerado é capaz de simular de forma eficiente o comportamento da hidráulica no CESM.

Assim como o modelo de hidráulica, o modelo de transporte representa bem os dados observados, onde o ictioplâncton modelado percorre todo o complexo estuarino se acumulando em regiões análogas as observadas até ser carregado para fora do CESM.

6. BIBLIOGRAFIA

AMARAL, R. F. DO; ALFREDINI, P. Modelação Hidrossedimentológica no Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão. *Diretoria da ABRH*, v. 15, n. 2, p. 5, 2010.

ARAÚJO-LIMA, C. A. R. M. *et al.* Número de vértebras de characiformes do rio Amazonas e seu uso na identificação de larvas do grupo. *Acta Amazonica*, v. 18, n. 1-2, p. 351–358, jun. 1988.

ASA, E. *et al.* Comparison of Linear and Nonlinear Kriging Methods for Characterization and Interpolation of Soil Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 26, n. 1, p. 11–18, 31 mar. 2011.

ASSELIN, R. Frequency Filter for Time Integrations. *Monthly Weather Review*, v. 100, n. 6, p. 487–490, 1 jun. 1972.

BALON, E. K. First catches of Lake Tanganyika clupeids (kapenta—*Limnothrissa miodon*) in Lake Kariba. *Fish.Res.Bull.Zambia*, v. 5, p. 175–186, 1971.

BÖCK, C. S.; ASSAD, L. P. DE F.; LANDAU, L. Implementação do modelo numérico hidrodinâmico POM na Baía de Guajará (Pará, Brasil). *XXXIII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional - CNMAC*, v. 3, n. 1, p. 605–611, 2010.

BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN. Cartas de Navegação Náutica. Niterói: DHN, 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA, Programa da Avaliação Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva – REVIZEE. Relatório executivo. Brasília DF, v.1, n.1. 135p, 2006.

CASULLI, V.; CHENG, R. T. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 15, n. 6, p. 629–648, setembro 1992.

CAVICCHIOLI, M.; NAKATANI, K.; SHIBATTA, O. A. Morphometric variation of larvae and juveniles of the piranhas *Serrasalmus spilopleura* and *S. marginatus* (Characidae: Serrasalminae) of the Paraná basin, Brazil. *Ichthyological Exploration of Freshwaters*, v. 8, p. 97–106, 1997.

COUTINHO, P. DA N.; MORAIS, J. O. DE. Distribuição de sedimentos na Baía de São José, no Estado do Maranhão (Brasil). *Arquivos de Ciências do Mar*, v. 16, n. 2, p. 123–127, 1976.

CURY, P.; ROY, C. Optimal Environmental Window and Pelagic Fish Recruitment Success in Upwelling Areas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 46, n. 4, p. 670–680, 1 abr. 1989.

CUSHING, D. H. The Regularity of the Spawning Season of Some Fishes. *ICES Journal of Marine Science*, v. 33, n. 1, p. 81–92, 1 nov. 1969.

DIAS, F.J.S. *Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará:*

Modelagem numérica e observações, Tese de Doutorado Dr., IO-USP, São Paulo, SP, Brasil, 2011.

EZER, T.; MELLOR, G. L. Continuous Assimilation of Geosat Altimeter Data into a Three-Dimensional Primitive Equation Gulf Stream Model. *Journal of Physical Oceanography*, v. 24, n. 4, p. 832–847, abr. 1994.

FARIA, A. C. E. A. DE; HAYASHI, C.; SOARES, C. M. Predação de larvas de pacu (*Piaractus mesopotamicus* , Holmberg) por copépodes ciclopóides (*Mesocyclops longisetus* , Thiébaud) em diferentes densidades e ambientes e com diferentes contrastes visuais. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v. 23, n. 0, p. 497–502, 9 maio 2008.

FILHO, S.; MARTINS, P. W. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 427–435, dez. 2005.

FISHER, H. B. *et al.* Mixing in Inland and Coastal Waters. *Academic Press*, v. 1, n. -1, p. 132p, 1979.

GALUCH, A. V. *et al.* Desenvolvimento inicial e distribuição temporal de larvas e juvenis de *Bryconamericus stramineus* Eigenmann, 1908 (Osteichthyes, Characidae) na planície alagável do alto rio Paraná, Brasil. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v. 25, n. 2, p. 335–343, 18 abr. 2003.

GERKING, S. D. (Org.). *Feeding Ecology of Fish*. San Diego: Academic Press, 1994.

GUICHARD, F. *et al.* Toward a Dynamic Metacommunity Approach to Marine Reserve Theory. *BioScience*, v. 54, n. 11, p. 1003–1011, 2004.

HANSEN, D. V.; RATTRAY, M. New dimensions in estuary classification. *Association for the Sciences of Limnology and Oceanography*, v. 11, n. 3, p. 319–326, 1 abr. 1966.

HARE, J. A. The use of early life stages in stock identification studies. In: S., C.; K., F.; J., W. *Stock Identification Methods*. [S.l.]: Academic Press, 2005. v. 1. p. 89–117.

HAYES, S. P. The temperature and salinity fine structure of the Mediterranean water in the western Atlantic. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, v. 22, p. 1–11, 1975.

HEMPEL, G. On the use of ichthyoplankton surveys. *FAO Fish.tech.Pap*, v. 122, p. 1–2, 1973.

HOSS, D. E.; THAYER, G. W. The importance of habitat to the early life history of estuarine dependent fishes. *American Fisheries Society*, v. 14, p. 147–158, 1993.

HOUDE, E. D. Patterns and consequences of selective processes in teleost early life histories. In: CHAMBERS, R. C.; TRIPPEL, E. A. (Org.). *Early Life History and Recruitment in Fish Populations*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997. p. 173–196.

IBGE. Ministério de Planejamento, Orçamento e Coordenação, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Zoneamento Geoambiental do estado do Maranhão*. Salvador, 1997.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, Precipitações e Intensidade dos Ventos históricos (1961 – 1990) para Ilha de São Luis. Em: (<http://www.inmet.gov.br>) Acesso em 10 de Dezembro de 2015.

JOYEUX, J.-C. The flood-tide ichthyoplanktonic community at the entrance into a Brazilian tropical estuary. *Journal of Plankton Research*, v. 26, n. 11, p. 1277–1287, 16 jun. 2004.

KJERFVE, B.; LACERDA, L. DE. Mangroves of Brazil. *Latin America Mangrove Ecosystem Technical Report*, v. 2, p. 245–272, 1993.

KURTZ, F. W.; MELLO, M. C.; ANDRADE, J. L. DE. Distribuição de larvas e juvenis de peixes capturados na região da península antártica durante os verões de 2002e 2003. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, v. 62, p. 300–307, 2004.

L Aidig, T. E.; Sakuma, K. M.; Stannard, J. A. Description and growth of larval and pelagic juvenile pygmy rockfish (*Sebastes wilsoni*) (family Sebastidae). *Fishery Bulletin*, v. 102, n. 3, p. 452–463, 2004.

Leis, J. M.; Carson-Ewart, B. M. *The larvae of Indo-Pacific coastal fishes: an identification guide to marine fish larvae*. [S.l.]: Brill, 2000. v. 2.

Leonard, B. P. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 19, n. 1, p. 59–98, 1 jun. 1979.

Linhares, V. P. *Circulação e massas de água na plataforma continental externa Amazônica*. 1995. text – Universidade de São Paulo, São Paulo SP, BRASIL, 1995.

Lopes, R. M. *et al.* Zooplankton and ichthyoplankton distribution on the southern Brazilian shelf: an overview. *Scientia Marina*, v. 70, p. 189–202, 1 jul. 2006.

Melo, A. B. C.; Cavalcanti, I. de A.; Souza, P. P. Zona de convergência intertropical do Atlântico. *Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina do Texto*, p. 26–41, 2009.

Miranda, L. B. DE. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. 2. ed. São Paulo SP, BRASIL: EdUSP, 2002. v. 42.

Molion, L. C. B.; Bernardo, S. DE O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, n. 1, p. 1–10, 2002.

Moser, H. G.; (U.S.), S. F. S. C. *The early stages of fishes in the California Current region*. [S.l.]: Marine Life Research Program, Scripps Institution of Oceanography, 1996.

Nelson, J. S. *Fishes of the World*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.

Neshyba, S. *Oceanography: perspectives on a fluid earth*. 1. ed. Toronto, CANADA: John Wiley & Sons, 1987. v. 1.

Northcote, T. Migratory Behaviour of Fish and its Significance to Movement through Riverine Fish Passage Facilities. *Fish Migration and Fish Bypasses*, bibtext:

northcote_migratory_1998, p. 3–18, 1 jan. 1998.

OKIYAMA, M. *An atlas of the early stage fishes in Japan*. 1. ed. Tokai, TOKYO: University press, 1988. v. 1.

OLIVAR, M.-P.; FORTUÑO, J.-M. *Guide to Ichthyoplankton of the Southeast Atlantic (Benguela Current Region)*. Spain: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Ciencias del Mar, 1991.

PARADIS, A. R.; PEPIN, P.; BROWN, J. A. Vulnerability of fish eggs and larvae to predation: review of the influence of the relative size of prey and predator. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 53, n. 6, p. 1226–1235, 1996.

PARRISH, R. H.; NELSON, C. S.; BAKUN, A. Transport Mechanisms and Reproductive Success of Fishes in the California Current. *Biological Oceanography*, v. 1, n. 2, p. 175–203, 1 jan. 1981.

PEREIRA, J. E. R.; WAINER, I. A mudança do clima e seus impactos no oceano Atlântico Sul em escala regional. In: AMBRIZZI, T.; ROBERTO JACOBI, P.; MÁRCIA MOSSO DUTRA, L. (Org.). *Ciência das Mudanças Climáticas e sua Interdisciplinaridade*. 1. ed. [S.l.]: annablume, 2014. p. 10–.

PITOMBEIRA, E. DA S.; MORAIS, J. O. Comportamento hidrodinâmico e sedimentológico do estuário do Rio Bacanga (São Luís, Estado do Maranhão, Brasil). *Arquivos de Ciências do Mar*, v. 17, p. 165–174, 1977.

PONTES, P. H. P.; EL-ROBRINI, M. Massa d'água da plataforma continental do Maranhão, durante o período seco (novembro, 1997). *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 21, n. 1, 2008.

POWER, J. H. Advection, Diffusion, and Drift Migrations of Larval Fish. In: MCCLEAVE, J. D. *et al.* (Org.). *Mechanisms of Migration in Fishes*. NATO Conference Series. [S.l.]: Springer US, 1984. v. 14. p. 27–37.

PRITCHARD; DONALD W. Estuarine circulation patterns. *American Geological Institute*, v. 2, p. 1–14, 1971.

RÉ, P. *Ictioplankton estuarino da Península Ibérica:(guia de identificação dos ovos e estados larvares planctonicos)*. Lisboa, PORTUGAL: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1999.

RICHARDS, W. J. *Early Stages of Atlantic Fishes: An Identification Guide for the Western Central North Atlantic, Two Volume Set*. [S.l.]: CRC Press, 2005. v. 2.

ROSMAN, P. C. C. Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos. *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos, Brasil, Associação brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 1, p. Cap. 3, 1997.

SANCHES, P. V. *et al.* Caracterização do desenvolvimento inicial de *Leporinus friderici* (Osteichthyes, Anostomidae) da bacia do rio Paraná, Brasil. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v. 23, n. 0, p. 383–389, 9 maio 2008.

- SANTIN, M. *et al.* Abundância e distribuição temporal de larvas de *Pachyurus bonariensis* Steindachner, 1879 (Perciformes, Sciaenidae), em uma baía do pantanal matogrossense - DOI: 10.4025/actascibiolsci.v31i1.306. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, v. 31, n. 1, p. 65–71, 14 abr. 2009.
- SANTOS, M. L. S. *Influência dos rios Amazonas e Pará sobre a biomassa fitoplanctônica*. 2000. Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de oceanografia., Pernambuco, BRASIL, 2000.
- SASSA, C. *et al.* Distribution patterns of larval myctophid fishes in the transition region of the western North Pacific. *Marine Biology*, v. 144, n. 3, p. 417–428, 10 out. 2003.
- SMITH P.E., S. L. R. Standard techniques for pelagic fish egg and larva surveys. *FAO Fisheries Technical Paper*, v. 175, p. 100, 1977.
- SOARES, R. D. B.; CUTRIM, M. V. J.; DA SILVEIRA, P. C. A. Comunidade ictioplanctônica da bacia hidrográfica do rio Bacanga na cidade de São Luis, Brasil. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 8, n. 1, p. p. 37–48, 2014.
- SOUZA FILHO, P. W. M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 427–435, 2005.
- TEIXEIRA, S. G.; FILHO, S.; E, P. W. M. Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, p. 69–82, 2009.
- TOLAN, J. M.; NEWSTEAD, D. A. Descriptions of larval, prejuvenile, and juvenile finescale menhaden (*Brevoortia gunteri*)(family Clupeidae), and comparisons to gulf menhaden (*B. patronus*). *Fishery Bulletin*, v. 102, n. 4, p. 723–732, 2004.
- WERNER, L. A.; FOLSOM, R. C.; MANCL, L. R. The relationship between auditory brainstem response and behavioral thresholds in normal hearing infants and adults. *Hearing Research*, PMID: 8376210, v. 68, n. 1, p. 131–141, jun. 1993.
- ZHANG, J.; LIU, H. A vertical 2-D numerical simulation of suspended sediment transport. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, v. 19, n. 2, p. 217–22