



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
CONSERVAÇÃO INTERNACIONAL
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA
INSTITUTO DE PESQUISAS CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS DO ESTADO DO AMAPÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE TROPICAL

ELDO SILVA DOS SANTOS

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E QUALIDADE DA ÁGUA EM REGIÃO DE
POROROCA NA FOZ DO RIO ARAGUARI-AP**

Macapá/AP
2012

ELDO SILVA DOS SANTOS

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E QUALIDADE DA ÁGUA EM REGIÃO DE
POROROCA NA FOZ DO RIO ARAGUARI-AP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Biodiversidade Tropical.

Área de concentração: Ecologia e Meio Ambiente

Macapá/AP
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá

Santos, Eldo Silva dos

Modelagem Hidrodinâmica e Qualidade da Água na Foz do Rio Araguari, Amapá – Amazônia Oriental - Brasil / Eldo Silva dos Santos; orientador Alan Cavalcanti da Cunha. Macapá, 2012.

113 f.

Dissertação (Mestrado) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical.

1. Análise Multivariada. 2. Bacia hidrográfica. 3. Perturbações hidráulicas. 4. Parametrização. 5. Cenários espaço-sazonais. 6. SisBaHiA – Amapá. I. Cunha, Alan Cavalcanti da, orient.. II. Fundação Universidade Federal do Amapá. III. Título.

CDD. (21.ed.) 551.48098116

ELDO SILVA DOS SANTOS

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA E QUALIDADE DA ÁGUA NA FOZ DO RIO
ARAGUARI-AP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Biodiversidade Tropical.

Área de concentração: Ecologia e Meio Ambiente

Data: 02 de julho de 2012

Orientador: Alan Cavalcanti da Cunha

Banca Examinadora:

Cláudio José Cavalcante Blanco - UFPA

Admilson Moreira Torres – IEPA

Marcelino Carneiro Guedes – EMBRAPA

Macapá/AP
2012

Aos meus filhos, Arthur e o que chegará nos próximos meses, e minha esposa Nália, inspirações da minha vida.

Aos meus pais Francisco e Maria, pelo exemplo e formação humana que me dão.

Aos meus irmãos Elber, Arles e Tarik, pelo companheirismo ao longo da vida.

Agradecimentos

A Deus, pela vida e força para superar os obstáculos.

Ao meu orientador, Alan, pela confiança que depositou no meu trabalho e pela grande parceria durante esta empreitada.

A minha esposa Nália e meu filho Arthur, por compreenderem minhas ausências nas fases críticas deste trabalho, pelo apoio e amor incondicionais que me dão.

A meus pais Francisco e Maria, a minha sogra Ana e cunhada Sinya que sempre me ajudaram e apoiaram, não só nesses 2 anos, mas desde sempre.

Aos amigos do laboratório Elane Cunha, Daímio Brito, Débora Isaackson, Arialdo Silveira Júnior, Priscila Brito, Gilvam Portela, Alzira Oliveira e Jefferson Erasmo pelas contribuições ao longo desses últimos dois anos.

A todos os colegas da turma de 2010 do PPGBio, em especial Elane Cunha, Luana Bittencourt, Edilson Cunha, Juan Vicente, Débora Arraes, Ana Beatriz, Gabriela Dias, Keliane Castro, Luis Maurício e Márcia Dayane, pela amizade, risadas, debates e experiências compartilhadas.

Ao geólogo Márcio Sousa da Silva e ao biólogo José Roberto Pantoja (Chicão), pelo grande apoio nos trabalhos de campo.

Aos colegas da Secretaria de Meio Ambiente – SEMA, pelo apoio e compreensão pelas ausências para que eu pudesse realizar atividades de campo e as disciplinas do mestrado.

Ao PPGBio/UNIFAP, em especial à profa. Helenilza Cunha, à Luciana Santos e à Rejane Peixoto, que, com muito dedicação e trabalho, tornam este programa de pós-graduação possível e o fazem evoluir constantemente.

Ao IEPA – Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, pela cessão do ADCP e outros equipamentos que, sem os quais, não seriam possíveis a obtenção dos resultados deste trabalho.

À coordenação do Curso de Ciências Ambientais, pela cessão do Laboratório de Química Ambiental para que pudesse realizar as análises físico-química e biológicas.

À equipe do ICMBio, Patrícia Pinha, Eduardo Marques, Veroca, Paco e Fernando, pela hospedagem e receptividade na base do Tabaco.

Ao Batalhão Ambiental, pela cessão da voadeira em três campanhas e dos pilotos Jânio e De Barreto, aos quais agradeço pela disposição e apoio de campo.

À Eletronorte, em especial ao Walcemir Cunha, pelos dados de vazão fornecidos.

Ao prof. Paulo Rosman – COPPE/UFRJ e sua equipe que foram essenciais para a compreensão do SisBaHiA, além da grande receptividade quando estive no Rio de Janeiro para o treinamento sobre essa grande ferramenta.

Ao Victor Paca – CPRM pela grande ajuda e troca de informações na utilização do ADP M9, usado para fazer a batimetria da foz do Araguari.

A CAPES, pela bolsa de estudos concedida e que permitiu custear boa parte das atividades de campo.

A todos, muito obrigado.

Sumário

Agradecimentos	10
Sumário	12
PREFÁCIO	13
Capítulo 1: Análise Estocástica Multivariada Espaço-Sazonal da Qualidade da Água em Área sob Influência da Pororoca na Foz do Rio Araguari-Amazônia-Brasil	19
Resumo	21
Abstract.....	23
1. Introdução.....	25
2. Material e Métodos.....	28
2.1. Área de Estudo	28
2.2. Coleta de amostras e análises físico-químicas, bióticas e hidrodinâmicas.....	30
2.3. Métodos Multivariados e Análises Estatísticas	32
3. Resultados.....	34
3.1. Caracterização espacial e temporal.....	34
3.2. Parâmetros físico-químicos, hidráulicos x parâmetros biológicos.....	37
3.3. Análise estatística multivariada	38
4. Discussão.....	41
4.1. Caracterização físico-química da qualidade da água	41
4.2. Indicadores biológicos	43
4.3. Análise Estatística Multivariada	44
5. Conclusão	48
Referências Bibliográficas	51
Capítulo 2: Parametrização, Modelagem e Simulação da Hidrodinâmica da Foz do Rio Araguari-Amapá-Amazônia Oriental/Brasil.....	55
Resumo	57
Abstract.....	59
1. Introdução.....	61
2. Material e Métodos.....	65
2.1. Descrição da área de estudo.....	65
2.2. Medição de descarga líquida	68
2.3. Batimetria	71
2.4. Modelo SisBaHiA	73
2.4.1. Discretização do Rio – Construção da Malha	76
2.4.2. Dados de Entrada e Parametrização do Modelo.....	77
2.4.3. Análise Estatística - Erros entre Experimento x Simulação.....	80
2.4.4. Calibração.....	81
3. Resultados.....	84
3.1. Descarga Líquida	84
3.2. Batimetria	85
3.3. Malha Numérica.....	86
3.4. Parametrização dos Cenários Hidrodinâmicos	87
4. Discussão.....	94
5. Aplicações do Modelo	100
5. 1 Análise de Cenário - Integração Hidrodinâmica x Taxa de Renovação Superficial	100
5. 2. Análise de Cenário - Integração Hidrodinâmica x Qualidade da Água	102
6. Conclusão	106
Referências Bibliográficas	108

PREFÁCIO

Esta dissertação será apresentada em formato alternativo, dividida em capítulos, cada qual correspondente a um artigo. Devido à escolha desse formato, algumas informações serão repetidas, como “Material e Métodos” e parte da introdução.

O primeiro capítulo apresenta o título “Análise Estocástica Multivariada Espaço-Sazonal da Qualidade da Água na Foz do Rio Araguari-Amazônia-Brasil” e tem como objetivo a caracterização espacial e temporal da qualidade da água do Rio Araguari e uma análise estatística multivariada com os parâmetros físico-químicos e biológicos coletados em sítios do Baixo Araguari.

O segundo capítulo apresenta o título “Parametrização, Modelagem e Simulação da Hidrodinâmica da Foz do Rio Araguari-Amapá-Amazônia Oriental/Brasil” e seu objetivo foi quantificar experimentalmente a descarga líquida do Rio Araguari próximo de sua foz e compará-las com simulações numéricas do escoamento feitas através do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA.

A Bacia do Rio Araguari está inserida na sua totalidade territorial no Estado do Amapá, drenando áreas significativas de Unidades de Conservação, com sua nascente no Platô das Guianas, na Serra do Tumucumaque (Parque Nacional Montanhas do Tumucumaque) e desaguando em sua foz às margens da Reserva do Lago Piratuba, na zona flúvio-marinha próxima e sob influência do Estuário Amazônico e Oceano Atlântico.

Por outro lado, entre estas duas referidas unidades de conservação há diversos empreendimentos econômicos de exploração mineral, usinas de geração hidroenergética, bubalinocultura extensiva, além da presença cada vez mais intensa da expansão urbana de pequeno e médio portes. Em ambos os casos, tanto da conservação quanto do desenvolvimento humano, há a imposição de uma série de restrições ambientais. Essa dialética exige a construção de conhecimento científico sobre o meio físico como forçantes e condicionantes da dinâmica de fluxos biogeoquímicos e do equilíbrio dos ecossistemas aquáticos locais. Pelo menos no que tange ao estado atual do conhecimento, que é ainda incipiente ou até mesmo ignorado pelo poder público que cuida da gestão desses territórios, toda a informação obtida é bem-vinda para a melhoria dos sistemas de gestão da bacia hidrográfica, especialmente no Baixo Rio Araguari, ambiente relativamente negligenciado pelos Estudos de Impactos Ambientais para a construção de hidrelétricas.

A integração das três vertentes balizadoras e fundamentais da gestão do meio abiótico em ecossistemas aquáticos (experimentação hidrodinâmica e qualidade da água, análise estocástica dos dados, e modelagem e simulação para elaboração de cenários ambientais) representam um avanço do estado atual da técnica e da abordagem metodológica. Principalmente a partir do uso de ferramentas e instrumentos disponíveis para tratamento específico da hidrodinâmica acoplada às variações da qualidade da água no eixo espacial e sazonal. Neste caso, referente à temática da experimentação e modelagem hidrodinâmica e da qualidade da água, os resultados desta investigação representam o "Estado da Arte" no referido trecho do Baixo Rio Araguari.

Portanto, esta pesquisa representa um esforço técnico-científico de mais alta relevância considerando o objetivo de tentar responder ou discutir quais parâmetros realmente são relevantes e interferem na dinâmica desses ecossistemas aquáticos. Apesar de muito úteis aos gestores de unidades de conservação e instituições que tratam do assunto meio ambiente em regiões estuarinas, estas têm sido pouco demandadas justamente pela ausência de conhecimentos locais e sobre sua importância nas políticas públicas ambientais estratégicas de conservação no Estado do Amapá.

De fato, a região da foz do Rio Araguari apresenta importância ecológica de grande significado para o Estado do Amapá, tanto do ponto de vista da gestão de bacias hidrográficas quanto do ponto de vista de sua sensível fragilidade ecossistêmica, especialmente diante de recorrentes ameaças de uso e ocupação do solo. Uma das ameaças consideráveis aos ecossistemas é a presença de estruturas hidráulicas no intercurso do Médio Rio Araguari, normalmente interferindo nos fluxos biogeoquímicos dos ecossistemas aquáticos, tanto no trecho de montante quanto no de jusante, gerando desequilíbrios e perturbações permanentes na bacia hidrográfica, sendo muitos destes efeitos ainda desconhecidos.

A presente dissertação trata da análise de potenciais perturbações causadas por impactos ambientais no trecho de jusante da Barragem da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHECN), no Rio Araguari, sem perder de vista as futuras instalações que se desenham em um breve período de tempo. No trecho de jusante da UHECN alguns impactos potencialmente negativos sobre os ecossistemas desta zona flúvio-marinha severamente questionados durante as audiências públicas de implantação de mais duas usinas hidrelétricas (UHE Ferreira Gomes e UHE Cachoeira Caldeirão), ambas localizadas no Município de Ferreira Gomes. O empreendimento mais a jusante é o de Ferreira Gomes, localizado a 220 km da foz, no Oceano Atlântico.

O ponto central dos questionamentos das audiências públicas, tanto pelas instituições ambientais quanto pelas populações potencialmente impactadas, especialmente a comunidade de Cutias do Araguari, foi que a presença de novas usinas hidrelétricas causariam efeitos hidráulicos como interferências de remansos causados pelo sistema operacional da UHECN, e as novas usinas, no sentido de montante para jusante. Assim, as interferências ocorreriam sobre a dinâmica das marés, especialmente na "pororoca", ou na formação geomorfológica das margens, hidrodinâmica natural do escoamento, mudança no substrato de fundo, entre outros fatores dependentes da hidrodinâmica e da qualidade da água que sustentam o equilíbrio dos ecossistemas desses ambientes aquáticos. Durante e após as audiências públicas, ocorridas em 2010, estes questionamentos ficaram em aberto e sem as respostas sobre os reais efeitos dos impactos e se havia ou não interferências significativas após implantação das futuras e atual barragem da UHECN (revitalização) sobre a hidrodinâmica do escoamento na foz do Rio Araguari.

A presente investigação não responde a todos os questionamentos das audiências públicas, mas apresenta novas e inéditas informações científicas a respeito desses complexos ecossistemas e que podem servir de ponto de partida para discussão e análises subsequentes, bem como suporte às tomadas de decisões necessárias à gestão dos ecossistemas e de recursos hídricos nesta região da bacia hidrográfica.

A presente contribuição desta investigação se inicia pela análise experimental em campo para avaliar o comportamento sazonal da hidrodinâmica e da qualidade da água, durante períodos de ciclos completos de marés semidiurnas próximas da foz do rio. Vale ressaltar que o esforço experimental foi enorme, pois envolveu uma difícil logística em região remota e sem condições de apoio de campo, além dos elevados riscos associados ao deslocamento e permanência em zona de ocorrência da pororoca, em especial nos períodos chuvosos e locais onde "surgiam" ilhas no canal principal durante os períodos secos. Portanto, a escolha dos sítios de coleta de amostras de água e medidas de descarga líquida foram extremamente sensíveis às condições adversas impostas por esta mesma logística. Contudo, com as devidas adaptações, houve êxito em todos os principais objetivos planejados para sua plena execução.

O primeiro passo foi a análise estocástica multivariada de parâmetros hidrodinâmicos (velocidade, profundidade, vazão) e qualidade da água (parâmetros físico-químicos, tais como oxigênio dissolvido (OD), turbidez, N-NH₄, sólidos suspensos, cloretos, entre outros, e parâmetros microbiológicos, como concentração de clorofila-*a*, *E. coli*, e coliformes totais). O objetivo foi avaliar a variação espaço-sazonal desses parâmetros da qualidade da água e

entender como a dinâmica do escoamento influencia a distribuição dos mesmos ao longo do trecho estudado do Rio Araguari. Neste caso, técnicas estatísticas de análises multivariadas foram empregadas com excelentes resultados concernentes às variações espaço-sazonais. Portanto, observar se ocorrem padrões de distribuição de concentrações de íons ou outros agentes passivos na água a partir de um conjunto ou grupo dessas variáveis no espaço e no tempo é uma informação útil e importante a ser alcançada nesta investigação.

Um segundo passo da investigação é o processo de desenvolvimento de modelagem e simulação numéricas aplicadas à elaboração de estudos, diagnósticos, prognósticos e cenários da hidrodinâmica e qualidade da água. Sua principal aplicação é em tomada de decisão ou como subsídio à gestão de recursos hídricos e ecologia aplicada à conservação de ecossistemas aquáticos. Os sistemas de modelagem disponíveis na literatura, tais como o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBaHiA®, foram utilizados como instrumento de investigação e, principalmente, como ferramenta de aprendizado sobre o funcionamento dinâmico das águas do Baixo Rio Araguari. Mas estes sistemas de modelagem e simulação dependem de uma série de dados de entrada nem sempre facilmente disponíveis. Em alguns casos, totalmente indisponíveis como é o caso da foz do Rio Araguari. Esta região nunca havia sido estudada com o propósito de avaliar sua hidrodinâmica integrada à variação espaço-sazonal da qualidade da água, considerando as forçantes naturais (oceano e hidrologia do rio) e antrópicas (uso e ocupação do solo).

É importante considerar, contudo, que o uso da modelagem considerou apenas os "efeitos" globais resultantes do uso e ocupação do solo nas seções de análise ou monitoramento da qualidade da água ou descarga líquida. Ou seja, sem a preocupação de detalhamento excessivo dos seus efeitos naturais ou antropogênicos geradores, até porque neste último caso há poucas informações a respeito. Assim, as condições iniciais e de contorno foram utilizadas na seção de entrada de vazão de montante e jusante no domínio computacional para avaliar exclusivamente os efeitos hidrológicos globais mediante suas variações de montante e variações semidiurnas das marés a jusante. Estas condições foram impostas sob as perspectiva da construção de um modelo numérico flexível e prático cuja finalidade foi exclusivamente elaborar cenários ambientais de interesse à conservação dos ecossistemas aquáticos fluvio-marinhos locais.

É importante ressaltar que no segundo capítulo, que trata da modelagem hidrodinâmica, foram elaboradas simulações acopladas que tratam da dispersão de poluentes na água. Dois casos foram tratados com este propósito: a) análise das taxas de renovação ou autodepuração das

águas (tempo de residência) e b) análise de cenário da qualidade da água, avaliando-se um caso típico de OD x DBO em ciclos de marés semidiurnas em uma das estações escolhidas ao longo do ano. Ambos os estudos demonstrativos foram elaborados para avaliar a importância básica da hidrodinâmica, tanto como base para os estudos ecológicos ou ambientais (autodepuração) quanto como base para avaliar o comportamento dos ciclos biogeoquímicos (ciclo do oxigênio ou do carbono) ao longo dos eixos espacial e sazonal na bacia hidrográfica.

Portanto, a contribuição desta dissertação é principalmente tratar da superação científica de pelo menos estas duas importantes lacunas de conhecimentos nos ambientes próximos da zona flúvio-marinha do Baixo Rio Araguari e sua confluência com o Oceano Atlântico no Estado do Amapá. Mesmo restritos, esses avanços são considerados importantes e motivadoras para a reflexão sobre a importância desses ambientes e promover o desenvolvimento de novas investigações sobre a temática.

Capítulo 1

Análise Estocástica Multivariada Espaço-Sazonal da Qualidade da Água na Foz do Rio Araguari-Amazônia- Brasil

Análise Estocástica Multivariada Espaço-Sazonal da Qualidade da Água em Área sob Influência da Pororoca na Foz do Rio Araguari-Amazônia-Brasil

Eldo Silva dos Santos, Alan Cavalcanti da Cunha, Elane Domênica Souza Cunha

Resumo

A análise de parâmetros da qualidade da água superficial de rios é bastante difundida para avaliar impactos antropogênicos em bacias hidrográficas. O objetivo deste trabalho é caracterizar espacial e sazonalmente alguns parâmetros da qualidade da água do Rio Araguari em um trecho de 165 km de extensão. Métodos estatísticos multivariados foram aplicados para avaliar como estas variações ocorrem em ambas as dimensões no referido trecho. Amostras de água superficial foram coletadas em cinco sítios no Baixo Rio Araguari, sendo quatro localizados em um trecho nos 60 km desde a foz, sob forte influência de maré semidiurnas, e um localizado na cidade de Cutias do Araguari a 165 km da foz, considerado como controle. Foram analisados dezesseis parâmetros, entre físico-químicos, biológicos e hidrodinâmicos, a partir dos quais se elaborou uma caracterização espacial e sazonal no trecho do rio. Uma Análise de Componentes Principais (PCA) foi empregada e os fatores avaliados foram reduzidos em duas dimensões cuja variação foi da ordem de 71%. Identificou-se que a sazonalidade (através dos parâmetros vazão e temperatura) e a hidrodinâmica estuarina (responsável pela dinâmica de transporte de sedimentos e caracterizada pelos ciclos de marés são os fatores que mais provocam as variações na qualidade da água. Uma Análise de Conjuntos (CA - *clusters*) complementar identificou padrões de agrupamentos característicos da qualidade da água, na qual se diferenciou grupos formados pelos pontos próximos à foz e grupos distantes da foz, representado pelo sítio próximo da cidade de Cutias. Com efeito, a influência da dimensão espacial foi mais significativa em Cutias do que em relação aos demais sítios próximos da foz, sendo preponderante em relação a influência da sazonalidade. Nesta última análise, a CA indicou a ocorrência de agrupamento dos valores medidos em Cutias mesmo quando se variam os quatro períodos sazonais de monitoramento. Em relação aos sítios próximos da foz do rio, o fator sazonalidade pesou significativamente. Neste caso, a CA indicou que os grupos foram formados de acordo com o período de coleta, não variando espacialmente. O Rio Araguari é um corpo d'água com características oligotróficas em todo o trecho estudado. Contudo, de acordo com as análises, durante o período seco, a região estuarina do Rio Araguari apresentou valores de cloretos, turbidez, cor aparente, condutividade elétrica, sólidos suspensos totais, sólidos totais dissolvidos, sólidos totais, nitrogênio amoniacal, coliformes totais e *E. Coli* maiores que a média dos outros períodos em decorrência da redução da vazão que, por sua vez tende a diminuir a capacidade de diluição das "cargas de poluentes" oriundas da bacia hidrográfica. As alterações no escoamento, seja por mudanças hidroclimáticas, seja por barramentos modificadores da dinâmica da vazão defluente, além de outras alterações no uso do solo podem causar alterações na qualidade da água no Rio Araguari nos demais períodos.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica, Análise multivariada, Análise de componentes principais, Análise de conjuntos, Pororoca

Multivariate Stochastic Analysis of Space-Seasonal Water Quality in Area under Influence of Tidal Bore in River Mouth Araguari-Amazon-Brazil

Eldo Silva dos Santos, Alan Cavalcanti da Cunha, Elane Domenica Souza Cunha

Abstract

The analysis of parameters of surface water quality of rivers is widespread to assess human impacts on watersheds. The objective of this study is to characterize spatial and seasonal some parameters of water quality Araguari River in a stretch of 165 km in length. Multivariate statistical methods were applied to evaluate how these changes occur in both dimensions in that stretch. Surface water samples were collected at five sites in the Lower Rio Araguari, four located in a stretch in 60 km from the mouth, strongly influenced by semidiurnal tides, and one in the city of Cutias do Araguari to 165 km from the mouth, which was the control point. Sixteen physico-chemical, biological and hydrodynamic parameters were analyzed, from which it drew up a spatial and seasonal characterization of the stretch of the river. A Principal Component Analysis (PCA) was used and evaluated factors were reduced in two dimensions whose variation was approximately 71%. It was found that the seasonality (through the flow and temperature parameters) and the estuarine hydrodynamics (responsible for the transport of sediments dynamics and characterized by tidal cycles) are the factors that cause variations in water quality. A Cluster Analysis (CA) identified additional patterns characteristic clusters of water quality, which differed in groups formed by the points near the mouth of the estuary and distant groups, represented by the site near the town of Cutias. Indeed, the influence of the spatial dimension was more significant in Cutias than in relation to other sites near the mouth, where seasonality predominates. In the final analysis, Cluster Analysis indicated the occurrence of the values measured in Cutias varied even when the four seasons of monitoring. For sites near the river mouth, the seasonality factor weighed significantly. In this case, the CA stated that the groups were formed according to the data collection period did not vary spatially. Finally, we conclude that the Araguari River is a body of water with oligotrophic characteristics throughout the studied stretch. However, according to the analysis, during the dry period, Araguari River estuary has decreased quality of some of the parameters due to the reduction in flow rate which in turn tends to decrease the ability of the dilution of "polluting loads" coming from the watershed. Changes in flow or by hydroclimatic changes, either by modifying flow rate dynamics due dams release, and other changes in land use, such as the presence of buffalo, can cause changes in water quality in the Rio Araguari in other periods.

Keywords: Watershed, multivariate analysis, principal components analysis, cluster analysis, tidal bore

1. Introdução

De acordo com Lung (1993), os modelos estuarinos podem ser classificados dentro de dois grupos: modelos hidrodinâmicos e modelos de qualidade da água. Estes modelos são designados para calcular a concentração ou distribuição de um constituinte, propriedade ou parâmetro no estuário. O mesmo autor afirma ainda que, para determinar as concentrações ou distribuições, processos de transportes e processos de transformação devem ser resolvidos. Os processos de transporte dependem basicamente da hidrodinâmica, incluindo a advecção, difusão turbulenta e, se a redução espacial é resolvida, dispersão. Por outro lado, os processos de transformação englobam as fontes e sumidouros para os quais os parâmetros são sujeitos e podem ser físicos, químicos ou biológicos.

No presente texto, a abordagem é complementar às duas citadas acima sobre a hidrodinâmica e qualidade da água, mas cuja base é avaliação estocástica dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da qualidade da água, tanto no espaço quanto em um horizonte temporal, que doravante denominaremos de sazonalidade.

Assim, o entendimento da dinâmica espaço-sazonal da qualidade da água em estuários é extremamente relevante como subsídio à gestão e conservação dos ecossistemas aquáticos. Por exemplo, em estudos teóricos baseados em modelos ecológicos, desde a década de 70, apresentavam-se a hipótese de que os ecossistemas poderiam mudar abruptamente de um estado estável para um estágio alternativo diferente do original (Fragoso Jr., 2009), haja vista que, no mundo real, as condições nunca são constantes.

Além disso, segundo Costanza et al. (1997), os estuários são os ecossistemas mais valiosos ligados às atividades humanas. O trecho do rio localizado em estuário reflete todas as ações decorrentes de alterações nas suas bacias hidrográficas e, por essa importância, diversos trabalhos científicos são realizados para avaliar impactos em estuários devido ao uso e ocupação do solo de bacias hidrográficas (Zheng et al., 2004; Boyer et al., 2009; Markand et al., 2011; DiDonato et al., 2009; Twilley et al., 1998; Capo et al., 2006; Kim et al., 2006; Domingues et al., 2007; Azevedo et al., 2008).

A análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água permite identificar características específicas relacionadas aos processos naturais e à ecologia aquática. Felizmente, o monitoramento desses parâmetros é um procedimento técnico relativamente simples e eficiente para acompanhar as modificações e impactos que a ação humana ou mesmo avaliar como os eventos naturais provocam mudanças nos corpos hídricos. Portanto, o

monitoramento serve como uma ferramenta essencial para a gestão e implantação de políticas públicas e ações no sentido de minimizar ou mitigar esses impactos, especialmente quando se objetiva o uso sustentável e a eficiente gestão da conservação de ecossistemas aquáticos (Brito, 2008; Bárbara et al., 2010).

Entretanto, o número de parâmetros possíveis de serem monitorados é elevado, pois depende do objetivo da pesquisa em questão. Com efeito, a análise de uma série histórica extensa ou em uma rede de monitoramento com vários sítios torna-se impraticável ou muito difícil pelo nível de exigência ou necessidade de acúmulo de informações. Por outro lado, cada vez mais têm sido aplicadas técnicas de análise estatística multivariadas para reduzir o número de informações a serem processadas, incrementando a agilidade na tomada de decisões e reduzindo custos de monitoramento (Jolliffe, 2002; Mckenna, 2003; Tan et al., 2006; Kazi et al., 2009; Julie et al., 2010; Liu et al., 2010; Olsen et al., 2012).

A bacia do Rio Araguari apresenta importância estratégica para o Amapá, tanto do ponto de vista econômico (geração de energia hidrelétrica, por exemplo), quanto do ambiental (Unidades de Conservação), devido às suas características únicas geográficas e biomas nela existentes. Sua extensão ocupa um terço de toda área territorial do Estado do Amapá, apresentando nascente e foz em seu território, sendo portanto exclusiva de uma região cujos biomas nela existentes são as florestas ombrófilas de terra firme, cerrado (savana), áreas alagadas e mangues estuarinos (IEPA, 2004). Devido a estas características únicas, o Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Amapá (CERH-AP) definiu esta bacia como prioritária para a criação do 1º Comitê de Bacia Hidrográfica do Estado, com previsão de implantação para o final de 2012.

Compreender a variabilidade espacial e sazonal das condições da qualidade da água na região sob influência da maré é essencial para o monitoramento, avaliação e previsão dos efeitos decorrentes das ações impactantes de uma bacia (DiDonato et al., 2009).

Neste contexto geral, realizou-se a primeira pesquisa com foco em subsidiar estas ações específicas de gestão na bacia do Rio Araguari, especialmente em seu baixo trecho, e da unidade de conservação da REBIO do Lago Piratuba. O objetivo geral foi avaliar o comportamento sazonal e espacial de 14 parâmetros físico-químicos e biológicos da qualidade da água. Todo este esforço objetiva a criação de bases comparativas, iniciando-se esta condição como uma referência inicial (atual) da qualidade da água na foz, antes da implantação das novas usinas hidrelétricas Ferreira Gomes e Cachoeira Caldeirão e revitalização da UHE de Coaracy Nunes.

No presente capítulo, foram aplicadas uma série de análises estocásticas de parâmetros físicos, químicos e biológicos, para gerar informações consistentes e aplicáveis ao gerenciamento e conservação de ecossistemas aquáticos no Estado do Amapá, especialmente, na Bacia do Rio Araguari. Neste contexto, utilizou-se de um vasto ferramental matemático, com uso de pacotes estatísticos que viabilizaram as informações necessárias à sua aplicação simplificada e prática pelos tomadores de decisão, especialmente os gestores e sociedade civil envolvida com o futuro Comitê de Bacia.

2. Material e Métodos

2.1. Área de Estudo

O Rio Araguari apresenta aproximadamente 617 km de extensão, nascendo na Serra da Lombada, no Parque Nacional (PARNA) Montanhas do Tumucumaque, e desaguando no Oceano Atlântico, ligeiramente ao norte da foz do rio Amazonas. Sua bacia é a maior do estado do Amapá/Brasil, com 42.700 km² de área de drenagem (Cunha et al., 2011), correspondendo a um terço da área total do estado. No trecho superior da bacia, estão instalados grande empreendimentos minerais, principalmente da sub-bacia do Rio Amapari. No trecho central do rio, existe a Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes (UHECN) e outras duas estão em fase de construção (Usina Hidrelétrica Ferreira Gomes - UHEFG) e licenciamento (Usina Hidrelétrica Cachoeira Caldeirão – UHECC). No Baixo Araguari, a região a partir da cidade de Ferreira Gomes, destaca-se como atividade econômica a bubalinocultura extensiva. (Figura 1).

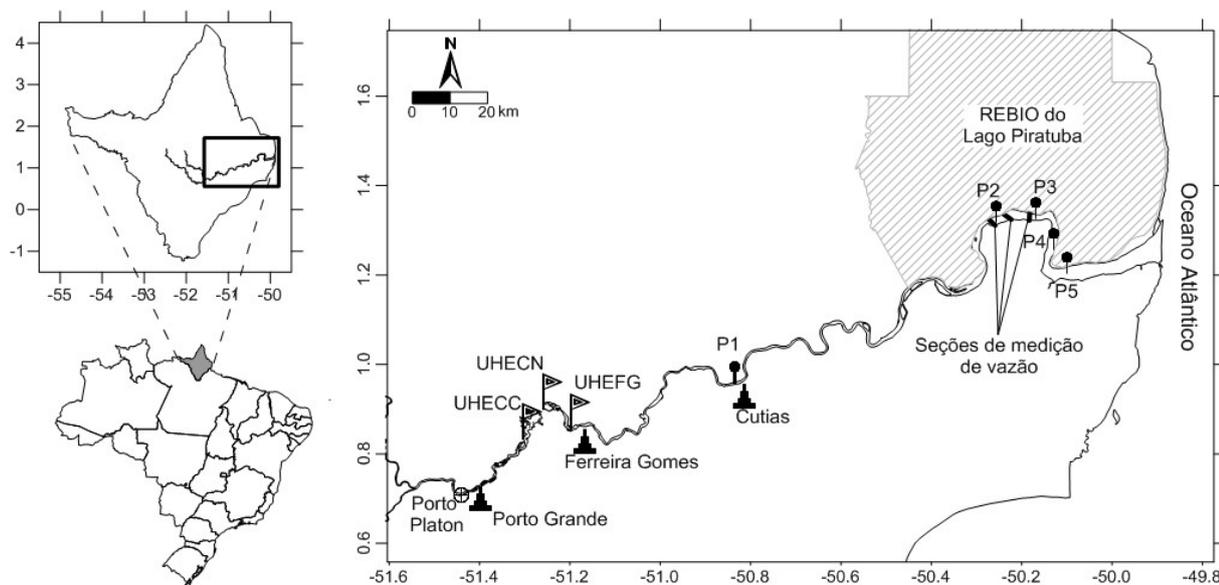


Figura 1: Área de estudo compreendendo o trecho flúvio-marinho do Rio Araguari sob influência de marés oceânicas

A Bacia do Rio Araguari banha Unidades de Conservação (UC) federais (21.925,7 km²), estaduais (7.127 km²) e áreas indígenas (2.472 km²), correspondendo a 74% de sua área total. No trecho inferior, onde foi realizada a presente pesquisa, o declive estimado é da ordem de 1 m em 224 km, com gradiente de 0,004 m/km (Eletronorte, 1999). Este trecho compreende a sub-bacia do Baixo Araguari e é caracterizado como uma planície flúvio-marinha (Brito, 2008; Bárbara et al., 2010; Silva, 2011).

A temperatura do ar na bacia varia, em média entre 20,0°C e 40,1°C (PROVAM, 1990; Brito, 2008; Bárbara et al., 2010; Cunha et al., 2011). A temperatura influencia os níveis de

concentração de saturação do oxigênio dissolvido na superfície da água (OD_{sat}), além de elevar as taxas de reações biogeoquímicas nos ecossistemas aquáticos (Brito, 2008; Bárbara et al., 2010; Cunha et al., 2012). Além disso, eleva também a taxa de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e diminui a taxa de absorção de oxigênio ou reaeração atmosférica (Cunha et al., 2011), alterando também outros processos semelhantes como a nitrificação da amônia.

As vazões apresentam um papel importante no equilíbrio ecológico porque interferem espacial e sazonalmente no equilíbrio ecossistêmico do corpo hídrico, especialmente nos fluxos e interações biogeoquímicas entre solo e água (Cunha et al., 2011). O conhecimento sobre os fluxos hídricos é de importância fundamental para compreender o funcionamento do ecossistema aquático e, especialmente, como informação de suporte ao gerenciamento recursos hídricos em bacias hidrográficas (Eletronorte, 1999; Dias, 2007; Cunha, Souza, et al., 2010).

O fluxo hidrológico sofre grande variação sazonal ao longo do ano no Rio Araguari, com vazão média mensal variando entre 190 m³/s (novembro) e 1916 m³/s (maio) (ANA, 2012) – Figura 2.

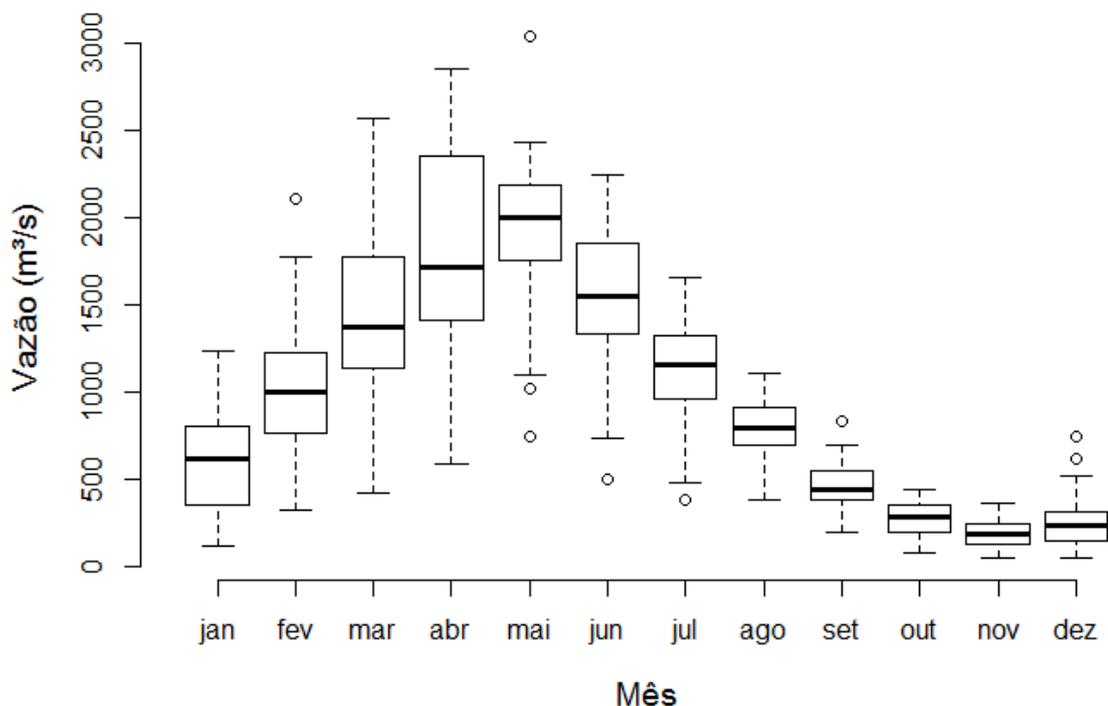


Figura 2: Vazões médias do Rio Araguari medidas na estação fluviométrica de Porto Platon (0°42'27"N, 51°26'20"O). Período de medição: janeiro/1952 a agosto/1958 e junho/1972 a dezembro/2011 (ANA, 2012). A linha central é a mediana dos dados, os limites da caixa são o 1° e 3° quartis e as linhas pontilhadas equivalem a 1,5 vezes o intervalo interquartil (1° e 3°) ou o maior valor medido, o que for menor. Os pontos são os outliers.

Na figura 2 é possível perceber que ocorre uma significativa variação dos valores médios da vazão, e respectivos desvios padrão em relação às médias. Observa-se que, as medidas extremas representadas pelos círculos fora dos boxes do gráfico, indicam uma considerável dependência da vazão com o período sazonal (Souza et al., 2010), com consequência na distribuição espaço sazonal da biodiversidade aquática (Cunha, 2012).

No extremo leste da bacia hidrográfica, no estuário do Rio Araguari ocorre tanto influência de macro-marés semidiurnas (amplitudes de até 4 m) quanto a influência da pororoca (tidal bore - com ondas de até 3 m acima do nível médio da superfície da água, dependendo do período sazonal hidrológico). Estes efeitos físicos imprimem e intensificam o nível de turbulência e as recirculações hidrodinâmicas, as quais influenciam significativamente o equilíbrio ecológico local no espaço e ao longo das estações climáticas.

2.2. Coleta de amostras e análises físico-químicas, bióticas e hidrodinâmicas

Em cinco sítios de coleta do trecho do Baixo Rio Araguari (tabela 1) foram executadas coletas e amostras de água a 50 cm abaixo da superfície, em frequência trimestral ao longo do ano de 2011. De acordo com a tabela 2, foram medidos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água e coletadas amostras que posteriormente foram analisadas no laboratório de Ciências Ambientais/UNIFAP em Macapá.

Os períodos hidrológicos de coleta foram definidos da seguinte forma: transição seca-cheia (SC – março), cheia (C – junho), transição cheia-seca (CS – setembro) e seca (S – dezembro), conforme característica climática sazonal da região.

Tabela 1: Pontos de coletas de dados (PCD)

PCD	Descrição	Coordenadas geográficas
P1	Em frente à cidade de Cutias (4.700 habitantes)	0°58'30,77"N / 50°48'33,13"O
P2	A 1,5 km a jusante da comunidade do Tabaco (cerca de 10 famílias)	1°19'21,63"N / 50°15'56,27"O
P3	Próximo à fazenda Vai-Quem-Quer	1°19'54,60"N / 50° 9'58,88"O
P4	Próximo à fazenda Princesa	1°15'38,66"N / 50° 7'59,77"O
P5	Próximo à comunidade Bom Amigo	1°12'17,24"N / 50° 4'46,50"O

A tabela 2 apresenta os parâmetros físico-químicos e bióticos analisados nesse trabalho. A preparação, coleta e preservação de todas as amostras foram feitas de acordo com o que estabelece as referências de cada um dos respectivos métodos da tabela. Para os parâmetros

cujos valores analisados eram maiores que o limite de detecção da metodologia, procedeu-se a diluição com água destilada até que fosse possível quantificá-la na referida escala de análise.

Tabela 2: Parâmetros e métodos utilizados para análise dos parâmetros físico-químicos e bióticos

Parâmetro	Sigla	Método	Referência
Temperatura	T	Sonda multiparâmetros YSI 556 MPS	(YSI Environmental, 2002)
Salinidade	Sal	Sonda multiparâmetros YSI 556 MPS	(YSI Environmental, 2002)
Cloretos	Cl	Tiocianato de mercúrio	(Hach Company, 2005)
Condutividade Elétrica	CE	Sonda multiparâmetros YSI 556 MPS	(YSI Environmental, 2002)
Turbidez	Turb	Nefelométrico	(Hach Company, 1998)
Cor Aparente	Cor	Padrão de Platina-Cobalto	(Hach Company, 2005)
Sólidos Suspensos Totais	SST	Fotométrico	(Hach Company, 2005)
Sólidos Totais Dissolvidos	STD	Sonda multiparâmetros YSI 556 MPS	(YSI Environmental, 2002)
Sólidos Totais	ST	Adição de STD+SST	
Oxigênio Dissolvido	OD	Sonda multiparâmetros YSI 556 MPS	(YSI Environmental, 2002)
Nitrogênio Amoniacal	N-NH4	Nessler	(Hach Company, 2005)
Coliformes Totais	CT	Teste para coliforme enzima-substrato	(APHA e al., 2005)
Coliformes Termotolerantes	EColi	Teste para coliforme enzima-substrato	(APHA e al., 2005)
Clorofila-a	ChlA	Espectrofotométrico	(Richards and Thompson, 1952; Parsons and Strickland, 1963)

Neste trabalho, coliformes totais, coliformes termotolerantes (*Escherichia coli*) e clorofila-a foram os parâmetros microbiológicos usados. Os coliformes totais estão associados diretamente com a decomposição da matéria orgânica, enquanto os coliformes termotolerantes, aqui representado pela *E. Coli*, são associados à poluição por fezes de animais de sangue quente. A clorofila é um parâmetro que é utilizado a muito tempo como indicador de produtividade e condição trófica de estuários (Boyer et al., 2009) por está relacionada com a biomassa de fitoplânctons (Gregor & Marsálek, 2004).

A vazão foi obtida por intermédio do método de perfilação acústica doppler (Muste et al., 2004; Dinehart & Burau, 2005; Mueller & Wagner, 2009; Cunha et al., 2012). A vazão foi sempre quantificada no dia anterior à coleta de amostras em seções distantes 49 km (em março e junho/2011), 54 km (em setembro/2011) e 59 km (dezembro/2011) da foz do Rio Araguari. O procedimento de medida contemplou um ciclo completo de maré semidiurna (12,5 h), conforme descrição de Cunha et al. (2010). O equipamento utilizado para este procedimento foi o ADCP WorkHorse Rio Grande, 600kHz, RD Instruments®.

2.3. Métodos Multivariados e Análises Estatísticas

As análises estatísticas deste trabalho foram feitas através do Excel 2007 (Microsoft Office®), BioEstat 5.0 (Ayres et al., 2007) e R-Project 2.15.0 (R Development Core Team, 2012).

Para todos os parâmetros, executou-se o teste de Shapiro-Wilks para avaliar a normalidade das distribuições (Petternelli and Mello, 2012). Como a maioria das distribuições não apresentou comportamento normal, utilizou-se o coeficiente de Spearman para construir uma matriz de correlação dos parâmetros físico-químicos e hidráulicos e desses com os parâmetros bióticos de interesse (coliformes totais, coliformes termotolerantes e clorofila-a).

Procedeu-se inicialmente uma análise de componentes principais (PCA) para determinar quais variáveis estão correlacionadas e potencialmente reduzir as dimensões relacionadas aos dados coletados a um número menor de eixos ortogonais, chamados de componentes principais (PC). Assim foi possível quantificar a importância de cada dimensão para descrever a variabilidade do conjunto de dados e interpretá-los de acordo com os objetivos da análise.

A PCA não é um teste estatístico, mas sim um procedimento heurístico. Seu objetivo é representar as informações das variáveis/parâmetros originais através de um número reduzido de eixos (Jolliffe, 2002; Borcard, Gillet, & Legendre, 2011). Se as correlações entre as variáveis originais são altas, um número pequeno das componentes principais é capaz de reproduzir um padrão multivariado ou variação da qualidade da água quase tão bem quanto os dados iniciais. Com frequência, esses componentes estão relacionados com fontes específicas de impactos na qualidade da água (Olsen et al., 2012). Para definir quantas PCs são relevantes para a análise, adotou-se o modelo Broken-Stick, conforme Olsen et al. (2012) e Borcard, Gillet & Legendre (2011). Este último modelo é um procedimento simples que facilita a escolha do número de PCs suficientes e necessárias para a referida análise e entender os padrões de variação dos parâmetros.

A análise de conjuntos (CA) foi elaborada para agrupar os conjuntos de dados de acordo com as potenciais similaridades existentes entre eles. A CA compara os dados de uma amostra com as demais de todo o conjunto de dados e os agrupa por relações de similaridades (Mckenna, 2003). Na análise de conjuntos feita neste trabalho, foram usados todos os dados apresentados na tabela 3.

Com base nestas premissas, foi construído um dendograma, que apresenta visualmente o processo de agrupamento e a proximidade existente entre os sítios de coleta estudados. Esta técnica reduz drasticamente a dimensão dos dados originais e facilita o entendimento conjunto

sobre como estes parâmetros podem estar agrupados. Neste presente estudo, foi usado o método de Ward, com distância Euclidiana como medida de similaridade na análise de conjuntos, como em Kazi et al. (2009).

Com base nos procedimentos metodológicos descritos anteriormente, são mostrados os principais resultados da investigação, a seguir.

3. Resultados

3.1. Caracterização espacial e temporal

Os resultados de vazão, mostram que os períodos de transição seca-cheia (SC, medida em março/2011) e de cheia (C, medida em junho/2011) apresentam valores próximos, 2367 e 2540 m³/s, respectivamente. No período de transição cheia-seca (SC, medido em setembro 2011) a vazão foi de 650 m³/s e no período seco (S, dezembro/2011) foi de 316 m³/s. (Tabela 3).

A temperatura da água variou sazonalmente entre conforme o esperado pela característica climática da região (Oliveira et al, 2010).

Para os demais parâmetros físico-químicos e biológicos analisados, é marcante que no período seco ocorre o maior valor médio medido de todos eles, exceto para a concentração de clorofila-a (figura 4).

Neste referido período, os parâmetros salinidade, cloretos, condutividade elétrica, turbidez, cor, STD, ST e N-NH₄ apresentaram valores médios excessivamente acima dos demais que a comparação ficou prejudicada (figura 4). Contudo, a vazão reduzida do rio em dezembro, por conta da sazonalidade, explica o aumento da concentração de parâmetros da qualidade da água, em especial pelo baixo fator de diluição.

Por outro lado, no período cheio, os parâmetros cloreto, turbidez, cor, SST ST e N-NH₄ sofreram processo intenso de diluição, onde o fator vazão foi o responsável pela sua diminuição (figura 4). Por exemplo, o oxigênio dissolvido (OD) apresentou um valor abaixo de 5 mg/L, que é nível de concentração mínimo previsto pela legislação existente para esse tipo de rio (classe II, segundo Brasil (2005)). Mas nos demais períodos, o nível de OD foi maior que os 5mg/L recomendados pela referida legislação (figura 4).

Os parâmetros bióticos, coliformes totais, *E. Coli* e clorofila-a, não apresentaram valores tão extremos quanto os parâmetros físico-químicos no período seco, apesar de, neste período, coliformes totais e *E. Coli*, tenham apresentados valores superiores às médias normalmente encontradas no Rio Araguari (figura 4).

Em relação às variações espaciais, entre os pontos de coleta de dados, a média da temperatura da água variou inversamente à distância da foz. Isso pode ser explicado porque o procedimento de coleta iniciava pelo sítio amostral P5, por volta de 6:30 h, e se encerrava em

P1, aproximadamente às 13:00h. Portanto a pequena oscilação de aproximadamente 2 °C da temperatura diurna não foi considerada como significativa ao longo do período,

O sítio amostral P1 só não apresentou os menores valores médios para temperatura e OD, onde ocorreu o maior registro. Em P2, a média anual de *E. Coli*, foi a maior entre todos os sítios amostrais. Os sítios P3 e P4 apresentaram comportamentos semelhantes para turbidez, cor, sólidos suspensos totais, sólidos totais e nitrogênio amoniacal.

O sítio amostral P5 apresentou os maiores valores médios de salinidade, cloretos, condutividade elétrica, STD e ST, devido a proximidade com a foz e o oceano. Esses parâmetros estão diretamente relacionados com a hidrodinâmica estuarina (como o revolvimento e ressuspensão de sólidos) bem como o fenômeno da intrusão salina durante as inversões de marés semidiurnas.

Tabela 3: Tabela 1: Resumo dos dados de campo: hidrodinâmicos, físico-químicos e biológicos.

PCD	Dist	Q	T	Sal	Cl	CE	Turb	Cor	SST	STD	ST	OD	N-NH4	CT	EColi	ChIA
<i>Limites</i>	---	---	---	---	250 ¹	---	100 ¹	75 ^{1,2}	---	500	---	5 ³	3,7 ¹	---	1000 ¹	30 ¹
P1-SC	165	2367	27,5	0,01	2,5	19	4,71	<u>87</u>	6	9	15	6,34	0,30	86	16	3,43
P2-SC	57	2367	27,8	0,02	6,3	40	8,2	<u>173</u>	13	19	32	<u>4,42</u>	0,48	61	39	4,21
P3-SC	45	2367	27,8	0,02	12,1	52	18,8	<u>398</u>	28	25	53	<u>2,03</u>	0,67	81	34	5,27
P4-SC	34	2367	27,5	0,02	5,5	36	15,8	<u>252</u>	33	17	50	5,12	0,60	74	6	5,40
P5-SC	20	2367	27,6	0,02	13,2	54	74,9	<u>620</u>	191	26	217	<u>3,67</u>	0,97	105	7	4,88
Média do período			27,6	0,02	7,9	40	24,5	306	54	19	73	4,32	0,60	81	20	4,64
P1-C	165	2540	27,0	0,01	3,0	21	4,8	101	8	10	18	7,08	0,22	81	16	3,58
P2-C	57	2540	26,8	0,01	2,9	37	6,4	<u>122</u>	10	18	28	5,72	0,28	77	15	4,62
P3-C	45	2540	27,3	0,01	5,7	28	13,7	<u>215</u>	29	13	42	<u>3,28</u>	0,46	2420	29	1,68
P4-C	34	2540	27,0	0,01	3,0	21	19,3	<u>186</u>	36	10	46	5,76	0,36	345	10	2,99
P5-C	20	2540	27,2	0,01	4,9	26	35,6	<u>321</u>	56	12	68	5,68	0,51	1733	22	2,90
Média do período			27,1	0,01	3,9	27	16,0	189	28	13	40	5,50	0,37	931	18	3,15
P1-CS	165	650	30,2	0,01	2,5	20	4,79	67	7	9	16	5,95	0,17	488	10	6,48
P2-CS	57	650	29,9	0,01	4,3	21	23,0	<u>143</u>	33	10	43	5,53	0,28	579	10	7,59
P3-CS	45	650	29,5	0,01	6,5	24	35,3	<u>213</u>	51	11	62	5,86	0,45	579	11	9,43
P4-CS	34	650	29,8	0,01	7,2	24	26,9	<u>255</u>	124	11	135	5,71	0,54	517	8	10,49
P5-CS	20	650	29,5	0,01	18,5	35	61,0	<u>520</u>	267	16	283	5,82	1,09	770	18	9,53
Média do período			29,8	0,01	7,8	25	30,2	240	96	11	108	5,77	0,51	587	11	8,70
P1-S	165	316	30,5	0,01	5,4	26	5,46	56	7	15	22	7,07	0,19	346	6	4,49
P2-S	57	316	29,3	0,02	18,2	50	<u>215</u>	<u>1052</u>	196	30	226	7,04	1,21	2420	201	4,38
P3-S	45	316	29,0	0,05	108,8	112	<u>3084</u>	<u>10880</u>	2400	68	2468	7,19	<u>17,68</u>	1986	25	4,82
P4-S	34	316	28,8	0,49	<u>467,2</u>	1073	<u>3948</u>	<u>20672</u>	2832	<u>651</u>	3483	7,27	<u>15,50</u>	2420	36	6,39
P5-S	20	316	28,6	4,83	<u>5683,2</u>	9316	<u>782</u>	<u>3176</u>	678	<u>5666</u>	6344	7,79	<u>4,40</u>	727	34	5,67
Média do período			29,2	1,08	1256,6	2115	1607	7167	1222	1286	2509	7,27	7,80	1579	60	5,15
Média geral			28,4	0,28	319,0	552	419	1975	350	332	683	5,72	2,32	795	28	5,41

Legenda: PCD – ponto de coleta de dados; Dist – distância até a foz; Q – vazão média no dia da coleta; T – temperatura superficial da água; CE – condutividade elétrica ($\mu S/cm$); Sal – salinidade; OD – oxigênio dissolvido; Cor – cor aparente ($mg Pt/L$); Turb – turbidez (UNT); STD – sólidos totais dissolvidos; SST – sólidos suspensos totais; ST – sólidos totais; Cl – cloretos; N-NH4 – nitrogênio amoniacal; CT – coliformes totais; EColi – coliformes termotolerantes - *Escherichia coli*, ChIA – clorofila-A ($\mu g/L$).

Sufixos dos pontos de amostragem: SC: intermediário seca-cheia (coletado em março/2011); C: cheia (coletado em junho/11); CS: intermediário cheia-seca (coletado em setembro/2011) e S: seca (coletado em dezembro/2011). Destacados em itálico e sublinhado os valores que superam limites de Brasil (2005).

¹ Valor máximo segundo classificação de corpo d'água classe II (Brasil, 2005)
² A legislação prevê limite para cor verdadeira. Neste trabalho foi feita análise de cor aparente, que considera as substâncias dissolvidas e em suspensão, enquanto a cor verdadeira considera apenas as dissolvidas.
³ Valor mínimo segundo classificação de corpo d'água classe II (Brasil, 2005)

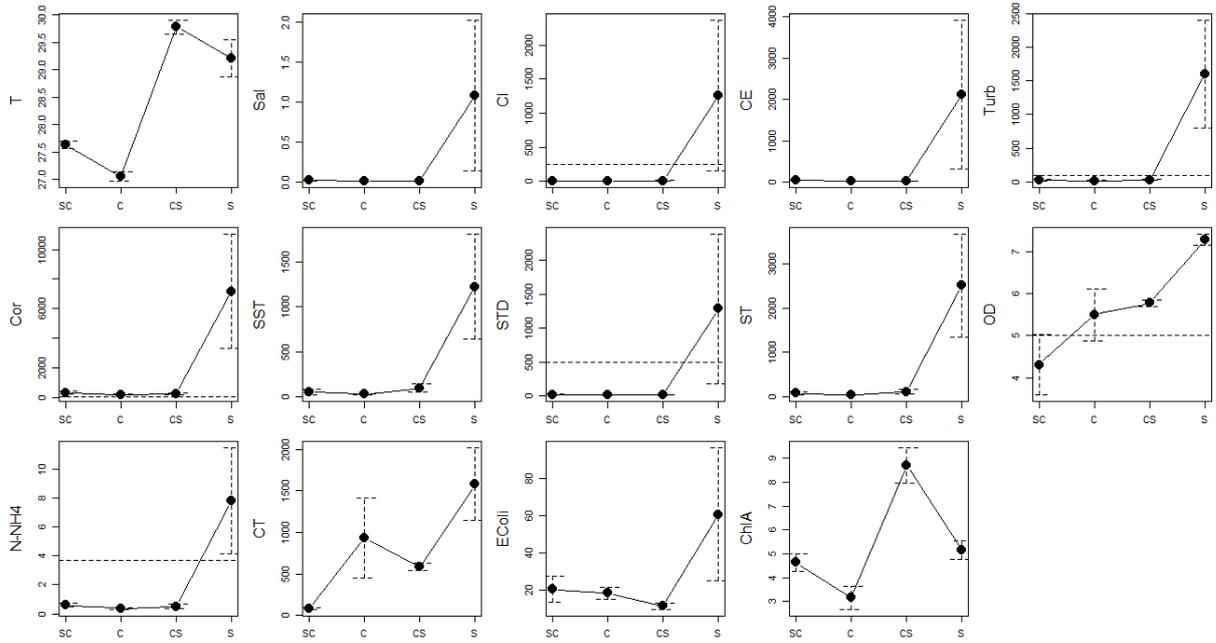


Figura 3: Variação dos parâmetros analisados por período de coleta, em 2011. SC = transição seca-cheia (março), C = cheia (junho), CS = transição cheia-seca (setembro) e S = seca (dezembro). O intervalo em cada ponto equivale ao erro padrão e as linhas horizontais pontilhadas correspondem aos limites da legislação existente para água doce de classe II ((Brasil, 2005), quando houver).

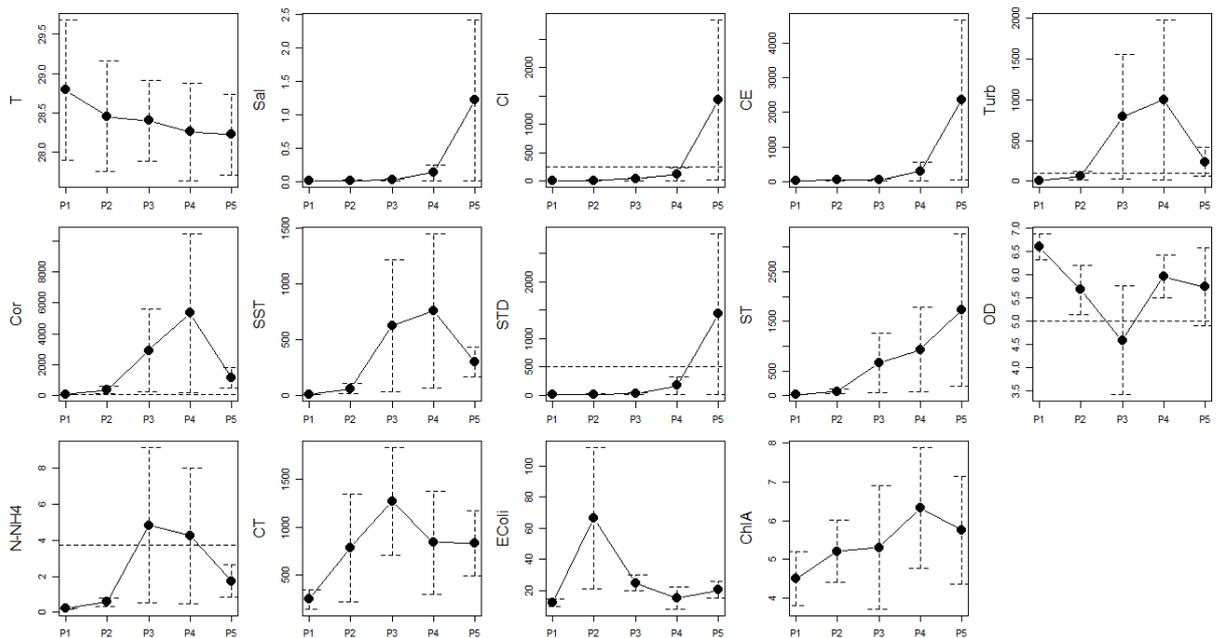


Figura 4: Variação dos parâmetros por ponto de coleta de dados.

3.2. Parâmetros físico-químicos, hidráulicos x parâmetros biológicos

A tabela 4 mostra a correlação existente entre os parâmetros bióticos analisados (coliformes totais, *E.Coli* e clorofila-a) com as variáveis físico-químicas e hidrodinâmicas. O teste de correlação de Spearman foi feito para todos os parâmetros, mas aqui são apresentados somente os resultados que apresentaram significância estatística ($p < 0,05$).

Tabela 4: Teste de correlação de Spearman entre parâmetros biológicos (Coliformes Totais, E. Coli e Clorofila-A) e parâmetros físico-químicos e sazonais (Q) ($p < 0,05$).

	Q	T	Sal	Cl	CE	Turb	Cor	SST	STD	ST	N-NH4
CT	-0,478	---	---	0,497	---	0,651	0,548	0,645	---	0,586	0,448
EColi	---	---	0,475	0,455	0,497	---	0,482	---	0,501	---	0,501
ChIA	-0,566	0,680	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Os coliformes totais (CT) sofrem influência direta (correlação positiva) de cloretos, turbidez, cor, sólidos suspensos totais, sólidos totais e nitrogênio amoniacal. A vazão apresentou correlação negativa com CT. Salinidade, cloretos, condutividade elétrica, cor, STD e N-NH4 estão diretamente relacionados com *E. Coli*. Em relação a clorofila-a, apenas a vazão e a temperatura apresentaram correlação significativa com esta, sendo negativa para vazão e positiva para temperatura da água.

3.3. Análise estatística multivariada

A análise de componentes principais (PCA) foi executada para 16 variáveis com 20 observações cada. Portanto, foram gerados 16 componentes principais (PC), equivalentes ao número de variáveis disponíveis. A figura 5 apresenta as proporções da variância total (ou *loadings*) dessas dimensões. Os dois primeiros componentes, PC₁, PC₂ foram selecionados, pelo método do Broken Stick, e representam 70,68% da variância total do conjunto dos dados.

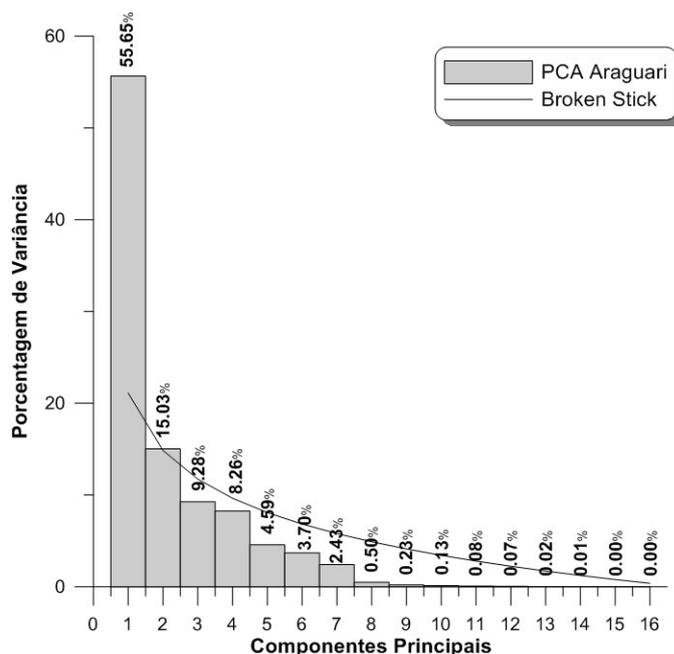


Figura 5: Porcentagem de variação das componentes principais e comparação com o modelo Broken Stick

Os resultados da PCA são apresentados na tabela 5 e na figura 6. Para PC₁, destacam-se ST, SST, Turb, Cor, N-NH₄, STD, CE, Cl, no sentido negativo e Q no sentido positivo. Em relação à PC₂, os parâmetros com maior peso foram o clorofila-A, vazão e temperatura.

Tabela 5: Coeficientes dos parâmetros em relação aos três componentes principais da PCA. As células destacadas são aquelas com maiores valores em cada componente. Os números em negrito são os maiores *loadings* no componente que não tenham aparecido em um PC anterior.

Parâmetro	PC1	PC2
CE	-0.295	-0.146
ChIA	-0.085	0.416
Cl	-0.319	-0.078
CT	-0.199	0.178
Cor	-0.311	-0.102
dist	0.17	0.247
EColi	-0.145	-0.167
N-NH ₄	-0.299	-0.033
OD	-0.129	0.313
Q	0.231	-0.441
Sal	-0.234	-0.12
ST	-0.33	-0.043
SST	-0.309	-0.01
STD	-0.298	-0.134
T	-0.085	0.583
Turb	-0.32	-0.015
% variância	40,48%	22,57%
Broken Stick	21,13%	14,88%

A figura 6 é a representação cartesiana dos loadings de cada componente em relação aos outros. O coeficiente de cada parâmetro na componente principal equivale à projeção do seu vetor no eixo que representa a PC.

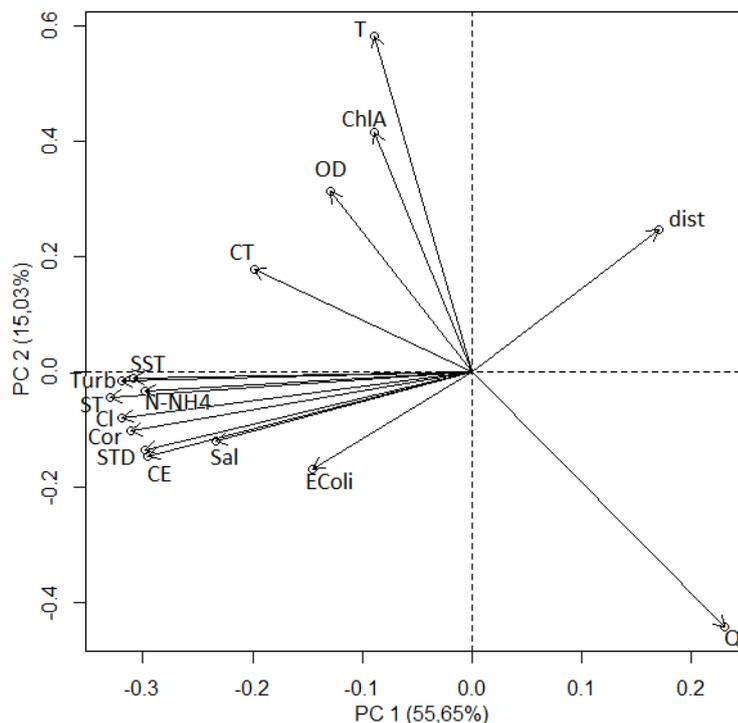


Figura 6: Gráfico dos *loadings* dos três primeiros componentes principais da PCA, que, juntos, são responsáveis por 70,68% da variância.

A partir da análise de conjuntos construiu-se o dendograma apresentado na figura 7. Os grupos identificados se assemelham entre os pontos que os compõem de, pelo menos, 70%. Por esse critério, dois pontos, cujas amostras foram coletadas no período seco, não foram classificados em nenhum dos grupos: P2 e P5.

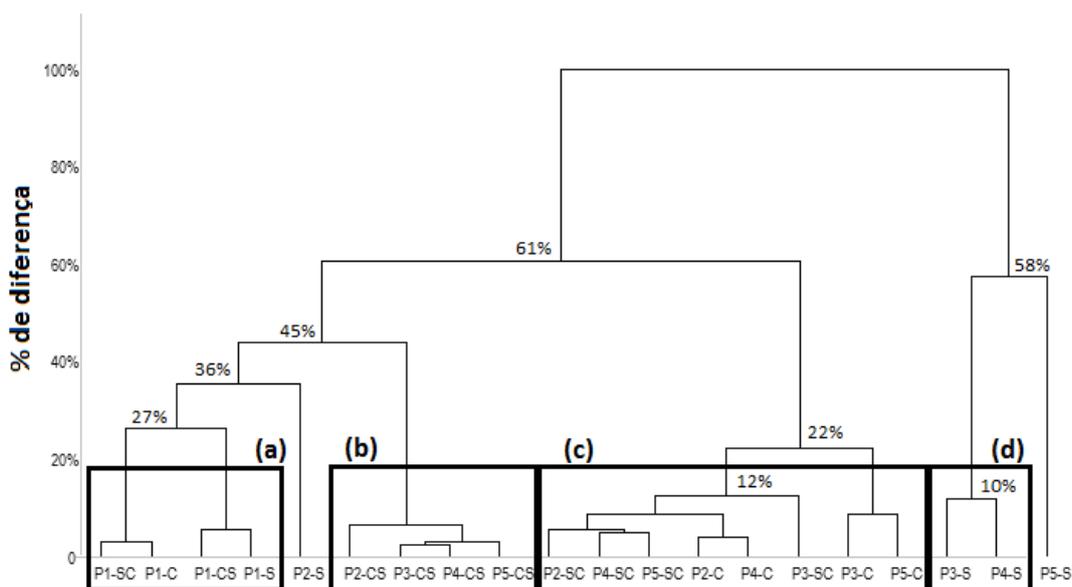


Figura 7: Dendrograma. Foram identificados 4 agrupamentos: (a) grupo com ponto em frente à cidade de Cutias (P1) em todos os trimestres medidos, (b) pontos da zona estuarina no período de transição cheia-seca, (c) pontos dos períodos de transição seca-cheia e de cheia e (d) pontos próximos à foz no período seco

4. Discussão

4.1. Caracterização físico-química da qualidade da água

O Rio Araguari no trecho estudado apresentou, em linhas gerais, bons resultados de qualidade da água para os parâmetros microbiológicos em todos os períodos analisados (tabela 3), uma vez que os valores obtidos estavam dentro do previsto pela legislação (Brasil, 2005). Além disso, o parâmetro clorofila-a apresentou resultados que variaram entre 1,68 e 10,49 µg/L, indicando que o Baixo Rio Araguari apresenta-se também, assim como no Alto e Médio cursos, características de ecossistemas aquáticos oligotróficos (Cunha, 2012). Esse resultado corrobora com alguns dados obtidos em outros trabalhos realizados neste mesmo rio, em trechos a jusante deste estudo (Dias, 2007; Brito, 2008; Bárbara et al., 2010; Cunha, 2012).

Em relação aos parâmetros físico-químicos, o oxigênio dissolvido (OD) apresentou em três pontos ao longo do ano valores abaixo do limite de 5 mg/L (Brasil, 2005) em março/11 e um em junho/11 (tabela 3). Em ambos os períodos, o ponto P3 apresentou os valores mais baixos de OD. Outro fator que se assemelha nesses períodos é que as vazões medidas foram próximas e as mais altas de todas as coletas. Nos trabalhos de Brito (2008), Bárbara et al. (2010) e Cunha (2012) os valores de oxigênio dissolvido medidos no Rio Araguari no trecho entre o ponto P1 deste estudo e 160 km a jusante dele, foram sempre maiores que 5 mg/L, alcançando, em alguns casos, níveis próximos à saturação.

Uma grande diferença entre este estudo e os acima citados é que no trecho do Alto e, principalmente, Médio Araguari é que há correntezas que atuam como reaeradores naturais do rio. No Baixo Araguari, por ser uma planície de inundação influenciada por maré (Santos, 2006; Dias, 2007), o rio flui sem grandes acidentes hidráulicos, o que tende a reduzir a taxa de troca de oxigênio atmosfera-água. Assim a forçante que passa a controlar essa transferência de oxigênio para o rio é a ação dos ventos alísios incidentes e oriundos dos grandes sistemas de circulação atmosférica na região (Cunha, Souza, et al., 2010). Além disso, devido a maior vazão que ocorre de março até junho, a velocidade da água corrente tende a ser maior, condicionando as trocas de oxigênio com o ar. Devido a menor taxa de renovação superficial da interface ar-água, tende a ocorrer uma mudança de comportamento desse parâmetro nos períodos de cheia e intermediário seca-cheia.

Em relação à cor aparente, os valores acima do limite da legislação podem em parte ser explicados porque a lei se refere à cor verdadeira, que indica apenas a presença de matéria orgânica suspensa. A cor aparente considera também o matéria em suspensão e portanto é

natural que esta seja maior que a primeira. Outra consideração importante é que os rios amazônicos são naturalmente ricos em matéria orgânica e substâncias húmicas que dão a coloração marrom avermelhada à água (Tucci, 2002; Viana, 2002; Junk et al., 2011). Outro aspecto a ser considerado é que, na bacia do Rio Araguari, ocorre intensa atividade mineral, especialmente a exploração de ferro e manganês (no passado), que são os principais constituintes que dão cor à água (Richter & Azevedo Neto, 1991; Brito, 2008). Porém, apesar dessas características da bacia, os valores foram bastante elevados, acima dos obtidos por Brito (2008), Bárbara et al. (2010) e Cunha (2012). Esse comportamento pode estar associado aos valores elevados de sólidos totais, neste trecho do rio, em comparação com aos outros trabalhos, provocado, principalmente pelo carreamento causado pelos alagamentos nessa planície de inundação e, talvez, aumentados pela erosão provocada pela bubalinocultura extensiva.

Analisando-se agora o período seco, a tabela 3 e as figuras 3 e 4, apresentam o comportamento singular desse período em relação aos demais. Pelos resultados apresentados, fica claro o impacto da hidrodinâmica estuarina que provoca grande ressuspensão dos sedimentos e erosão nas margens que associados à menor vazão devida a sazonalidade elevam a concentração de praticamente todos os parâmetros, principalmente os relacionados aos sedimentos (STD, turbidez, cor, SST ST) e a intrusão salina (condutividade elétrica, salinidade e cloretos) já que a água oceânica tende a entrar com maior força por sofrer resistência da barreira hídrica fluvial. Sobre isso, a salinidade medida nos pontos P4 e, especialmente, P5 nesse período seco teve apresentado valor elevado em parte porque foram coletados em maré enchente, após a passagem da onda para jusante. Em relação à ressuspensão de sedimentos, pelo fato do Rio Araguari estar mais raso por conta do período seco, os ventos também podem ter grande influência na ressuspensão de sedimentos como observado por Chung et al. (2009) no mar Salton.

Os altos valores de nitrogênio amoniacal (N-NH₄) no período seco indicam que pode haver correlação entre este parâmetro e os demais que tiveram o mesmo comportamento. Aplicando-se o teste de correlação de Spearman entre N-NH₄ e os parâmetros SST, STD, ST, Cor, CE, Sal e Turb, obteve-se correlações entre 0,78 e 0,97 ($p < 0,01$). Esse resultado é semelhante ao de Rocha et al. (1995) e de Lillebø et al. (2005).

4.2. Indicadores biológicos

Analisando-se os indicadores biológicos usados nesse trabalho (CT, EColi e ChlA) e comparando-os com os limites descritos por (Brasil, 2005), observa-se pela tabela 3 e pelas figuras 3 e 4 que em nenhuma das amostras de qualquer dos períodos coletados a qualidade microbiológica da água se apresentou degradada, ou em desconformidade com a Resolução 357/2005 (Brasil, 2005).

Esse é um indicativo de baixo impacto microbiológico das ações antrópicas ou naturais no trecho estudado da bacia e da capacidade do Rio Araguari em diluir as cargas poluidoras que provocam alterações nesses parâmetros. Esse padrão também foi identificado por Brito (2008), Bárbara et al.(2010) e Cunha et al., (2011) que associaram esses resultados ao poder de autodepuração do Rio Araguari.

As correlações entre parâmetros físico-químicos e hidrodinâmicos com as variáveis biológicas apresentadas na tabela 4 mostram que há apenas uma associação média entre essas variáveis, com valores de r (coeficiente de spearman) entre 0,45 e 0,68. Mas o resultado dessas correlações fornecem um indicativo ou nível da resposta em que a qualidade microbiológica sofre interferência de alterações dos parâmetros físico-químicos e hidrodinâmicos no referido trecho.

A clorofila-a, indicador usado para avaliar a biomassa de fitoplâncton, apresentou relação inversa com vazão ($r = -0,566$) e direta com temperatura ($r = 0,680$) (tabela 4), o que é o esperado uma vez que o crescimento desses organismos está associado à disponibilidade de energia (temperatura) e são mais favorecidos por ambientes mais lânticos (Calijuri et al., 2008). Correlações semelhantes também foram obtidas para o Rio Araguari em seu trecho a montante da barragem da UHE Coaracy Nunes (Cunha, 2012). O fato de não haver correlação de clorofila com N-NH₄ pode indicar que o nitrogênio não é um nutriente limitante para o crescimento de biomassa.

Segundo Lung (1993), em sistemas estuarinos, diferentes nutrientes se tornam o fator limitante em diferentes períodos sazonais. Além do mais, níveis de pico de biomassa algal na superfície das águas não coincidem com o nível mais baixo de oxigênio em águas de fundo. Portanto, o referido autor sugere que é necessário avaliar as tendências da qualidade da água variáveis no tempo porque são indicativos importantes em relação à eutrofização estuarina.

Com base nas informações geradas da análise estatística, ou avaliação de modelos hidrodinâmicos ou de qualidade da água, algumas questões sobre o tema podem ser incluídas:

a) quais são os fatores e suas interrelações que causam a alteração da distribuição das algas (clorofila) na zona do Baixo Araguari e Zona Estuarina (próximo da foz)?; b) quais são as principais causas das variações de entrada de nutrientes (pontuais ou não-pontuais) que provocam a ocorrência ou persistência de suas distribuições no trecho e ao longo dos períodos sazonais?

As presentes análises respondem parcialmente a estas questões, mas na medida em que se identificam as correlações entre as variáveis envolvidas (nutrientes, agentes químicos, agentes microbiológicos, hidrodinâmica, entre outros).

Assim, os mecanismos chave responsáveis pela sucessão de grupos de algas (não identificadas neste trabalho na região de jusante, mas estudado por Cunha (2012) na região de montante do Araguari), mas apenas representadas pela concentração de clorofila-a, são devido às diferentes dinâmicas de diferentes grupos de algas, normalmente dependentes da temperatura que, por sua vez, influencia diferentemente as taxas de crescimento das algas, como por exemplo, as diatomáceas, as verdes, as azuis-verdes (Lung, 1993). Durante a respiração e morte algal, uma fração do nitrogênio celular é retornado para o ciclo do nitrogênio, o nitrogênio orgânico sofre uma decomposição bacteriológica que no fim é nitrogênio amoniacal. Esta, na presença de bactérias nitrificantes e oxigênio, é oxidado para nitrito (nitrificação), sendo que a desnitrificação do sedimento de fundo pode ser uma das maiores mecanismos de perdas em alguns sistemas.

Lung (1993) reforça que a redução de nutrientes tem sido uma das práticas utilizadas para gerenciamento da qualidade da água em muitos sistemas de estuários já eutrofizados. Mas este não é o caso do Rio Araguari, mesmo na região de impactos causadas por hidrelétricas no seu médio e alto cursos (Cunha, 2012).

4.3. Análise Estatística Multivariada

Análise de Componentes Principais

A partir dos resultados para a Análise de Componentes Principais (PCA) dos três componentes selecionados pelo modelo do Broken Stick, foi possível inferir sobre o significado de cada um dos PC, uma vez que os eixos resultantes de uma PCA estão normalmente relacionados a um fator ou fonte de impacto na qualidade da água (Olsen et al., 2012).

Os parâmetros que tiveram maiores *loadings* para a PC₁ (cloretos, condutividade elétrica, turbidez, cor, sólidos totais dissolvidos, sólidos suspensos totais, sólidos totais e amônia)

permitiram inferir que este componente está associado a processos de transformação (biogeoquímica) específicos no trecho estudado.

Por outro lado, a concentração de cloretos e a condutividade elétrica estão relacionadas entre si. A presença de cloreto pode estar associada à poluição por esgoto, efluentes industriais, produção agrícola, lixiviação de rochas que contenham esse componente ou a mistura com água do mar (Brito, 2008). Este último fator provavelmente é o que se aplica à região, pela ausência ou insignificância dos demais. A condutividade elétrica ocorre pela presença de sais e sólidos suspensos que conduzam a eletricidade. Assim, com as trocas de água entre o rio e o oceano provocadas pelas inversões de maré e a dinâmica estuarina, esses três parâmetros se relacionam. Podemos, portanto, associar a PC₁ à intrusão salina provocada pela inversão da maré no estuário.

Na PC₁ destacam-se também os parâmetros turbidez, cor, SST, STD e ST (este com o maior *loading*). Esses parâmetros físico-químicos podem ser relacionados à dinâmica de transporte e ressuspensão de sedimentos no trecho estudado. A foz do Rio Araguari, é dominada por marés semidiurnas com elevação do nível d'água variando até 4 metros, além da ação da pororoca. Esse resultado é um indicio da importância que a circulação hidrodinâmica tem para a qualidade da água na região da foz do Rio Araguari na medida em que ela revolve o fundo, promove a ressuspensão dos sedimentos, erode as margens, carrega partículas e matéria orgânica da terra para o rio. Valores de cor elevados, por exemplo, aumentam a cor da água. Uma análise interessante em relação aos processos de mistura, descrita por Lung (1993), são as definições de zonas de mistura, que pode ser definida como o local onde a mistura completa não tem sido alcançado. Cunha et al. (2004), observou em estudo do Igarapé da Fortaleza, afluente do Rio Amazonas e próximo de Macapá, que, ao longo de um ciclo de maré semidiurna, a variável mais influenciada era a turbidez em comparação a outros parâmetros como sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica ou oxigênio dissolvido. Esta observação sugere que as diferentes "plumas" que se encontram podem representar a conhecida zona de mistura das diferentes águas que se encontram.

Lung (1993) afirma que, quando se considera poluentes convencionais, como DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e nutrientes (fontes antrópicas) em estuários (Cunha et al., 2012), as escalas espacial e temporal associadas com a zona de mistura são insignificantes comparadas com as características espaço-temporal de problemas associados com a DBO e nutrientes (cinéticas, por exemplo). Com este entendimento, quando águas residuárias são descarregadas

em um corpo hídrico receptor, seu transporte pode ser dividido em dois estágios com distintas características de mistura, zona de mistura e zona de diluição.

No eixo da PC₂ da análise de componentes principais (figura 6) os parâmetros vazão, temperatura e clorofila-A tem os maiores *loadings* deste fator. Vazão e temperatura são fatores diretamente relacionados com a sazonalidade e o regime hidrológico do rio (Cunha et al., 2004). Portanto essa componente representa os fatores climáticos como influências na qualidade da água (Bastos, 2010). E a biomassa, representada pela clorofila-a, sugere a importância da dinâmica trófica para a qualidade da água da região de estudo (Cunha, 2012).

Portanto, a análise da PCA nos permite concluir que os fatores que mais influenciam a qualidade da água do trecho estudado são a intrusão salina no estuário e a dinâmica de sedimentos, os quais juntos são responsáveis por 55,65% das variâncias associadas a qualidade da água. Fatores climáticos e dinâmica trófica respondem por 15,03% das variações na qualidade da água na área de estudo.

Análise de Conjuntos

Complementar à PCA, a análise de conjuntos (ou *cluster*) fornece informações importante sobre a similaridade dos pontos coletados. O dendograma apresentado na figura 7 mostra o agrupamento claro de 4 grupos com similaridades de pelo menos 73% entre si.

O grupo (A) é formado por todas as coletas realizadas no sítio amostral P1, independente do período do ano. Esse resultado mostra que esse sítio se diferencia dos demais e que as características da qualidade da água do Araguari na região estuarina podem ser consideradas diferentes do trecho fluvial, em frente a cidade de Cutias. Nesse caso, o fator espacial sobrepuja o fator sazonal.

As amostras coletadas nos sítios na região do estuário no mês de setembro/11 (período intermediário cheia-seca) se agruparam no grupo (B), com nível de semelhança maior que 90%. O grupo (C) é formado pelos oito pontos coletados no estuário nos períodos intermediário seca-cheia (março/11) e cheia (cheia). É importante ressaltar que esses dois períodos tiveram vazões próximas (2367 e 2540 m³/s, respectivamente, o que mostra como a vazão e, por consequência, a sazonalidade têm um papel importante na caracterização da qualidade da água na região próxima a foz. O quarto grupo mostrado no dendograma da figura 7 é formado por apenas pelos pontos P3 e P4 no período seco. Os sítios P2 e P5 no período seco (dezembro/11) tiveram comportamento distintos de qualquer dos demais grupos. O ponto P2 neste período apresentou mais similaridade com os pontos do sítio P1 (grupo A) e

o ponto P5 em relação aos P3 e P4 do mesmo período de coleta, mas com similaridade de apenas 42%.

A análise de conjuntos mostrou que há diferenças entre os sítios amostrais da foz e o do ponto amostral de Cutias, e que a sazonalidade é preponderante para representar as similaridades entre os pontos de coleta. O agrupamento dos pontos permite que possa se otimizar o monitoramento daquela região adotando-se menos pontos de coleta nos períodos similares, reduzindo-se assim custos com análise e possibilitando melhor estratégia de gestão da bacia hidrográfica na região de estudo (Weissenberger et al., 2010).

5. Conclusão

Neste trabalho foi realizada uma análise para caracterizar a qualidade da água em um trecho de 165 km do Rio Araguari (Amazônia Oriental-Brasil), compreendendo a região flúvio-marinha entre a foz e a cidade de Cutias do Araguari. O principal objetivo da investigação foi a realização de etapas sequenciais de monitoramento trimestrais da qualidade da água superficial em 5 sítios de coleta em 2011.

Além disso, este estudo mostrou que o uso de ferramentas estatísticas, como a análise multivariada, pode ser aplicada na caracterização e avaliação de impactos na qualidade da água em rios estuarinos. Assim, com base nos dados quantitativos da qualidade da água obtidos foram aplicadas técnicas estatísticas multivariadas de parâmetros físico-químicos, biológicos e hidráulicos (PCA e CA) para comparar e avaliar uma série de indicadores estatísticos, como agrupamentos e loadings dos componentes principais que sugerem situações de análises das características condicionantes do meio aquático e, portanto, identificadores da variação espaço-temporal da qualidade da água sob diferentes forçantes antrópicas e naturais no trecho do Baixo Rio Araguari.

A análise de componentes principais (PCA) permitiu identificar as fontes ou fatores responsáveis pelas variações da qualidade da água na área estudada (*loadings*). Neste caso, os fatores relacionados com a sazonalidade (vazão e temperatura da água), a hidrodinâmica estuarina (condutividade elétrica, cloretos), o transporte de sedimentos (sólidos suspensos, dissolvidos e totais) foram as principais influências físico-químicas, biológicas e hidráulicas na qualidade da água.

Através da análise de conjuntos (CA) foram identificados grupos semelhantes entre os sítios amostrais para avaliar o comportamento espacial e sazonal da qualidade da água no Baixo Araguari. Nos quatro pontos de amostragem localizados até 60 km da foz, a sazonalidade se mostrou mais influente para explicar as alterações físico-químicas, biológicas e hidrodinâmica que a distância longitudinal. Neste caso a CA indicou similaridade entre estes pontos, basicamente, por período de coleta ou período sazonal. Por outro lado, as campanhas em frente a cidade de Cutias (165 km da foz) formaram um grupo independente de dados, indicando que o fator distância é mais influente que a as variações sazonais neste ponto. Portanto, o trecho de Cutias do Araguari é um importante sítio que se difere dos demais e pode ser considerado como referência comparativa importante na caracterização deste trecho, destacando-se espacialmente dos demais sítios estudados mais próximos da foz.

Finalmente, as principais conclusões objetivas são enumeradas abaixo:

- 1) há diferenças significativas da qualidade da água, nos eixos espacial e sazonal, entre os cinco sítios amostrados, sendo o mais distante da foz, Cutias do Araguari, o que se destacou longitudinalmente dos demais, contudo foi observado um agrupamento de similaridade entre os parâmetros da qualidade da água entre os quatro restantes próximos da foz;
- 2) os efeitos preponderantes e modificadores da qualidade da água, representados pelas forçantes naturais (marés de jusante e hidrologia de montante da bacia) e antrópicas (represa, crescimento urbano), tendem a aumentar negativamente com a vazão, de acordo com a sazonalidade, onde se observam nítidas dissimilaridades entre os sítios distantes da foz e sítios próximos da foz, sendo os efeitos amortecidos nos períodos de transição chuvosos, além desses efeitos também se concentrarem em extensões longitudinais de até 60 km em relação à foz do rio, no máximo. Ao mesmo passo, em certos períodos, também ocorrem fortes variações da qualidade da água em um mesmo sítio, sendo sensíveis às variações sazonais ao longo das estações hidroclimáticas;
- 3) as variações da qualidade da água, do ponto de vista estatístico, podem ser agrupadas em dimensões secundárias (PCAs) e similaridades (CAs) que indicam quais parâmetros físicos, químicos e ou microbiológicos são relevantes ou se agrupam na análise e estudos de impactos ambientais que influenciam objetivamente (escala quantitativa) os ecossistemas aquáticos da zona estuarina;
- 4) Tanto a PCA quanto a CA fornecem objetivamente subsídios ou indicadores úteis à tomadas de decisão ao gerenciamento de unidades de conservação e gerenciamento de recursos hídricos, reduzindo o número de sítios que precisam ser utilizados em sistemas de monitoramento da qualidade da água na região estuarina do Rio Araguari. Além disso, a PCA e CA são ferramentas que permitem disponibilizar informações como subsídios à potenciais metodologias de monitoramento no futuro para o trecho do Baixo Rio Araguari.
- 5) O estudo das variações espaço-sazonais da bacia preencheu, de modo original, inédito e prático, uma lacuna de desinformação a respeito desses ecossistemas aquáticos dinâmicos e especiais no estado do Amapá. Sua importância está na descoberta das características únicas da qualidade da água em termos de respostas às diversas forçantes hidrodinâmicas, hidroclimáticas e ambientais que ocorrem na bacia hidrográfica, mesmo que não tenha sido possível distinguir com precisão as reais fontes antrópicas das fontes naturais que causam estas variações da qualidade da água;

6) Observou-se, de modo contundente, que as implicações físicas causadas pelas forçantes das marés semidiurnas oceânicas são concentradas, de fato, na região da foz do rio, não apresentando tanta influência no eixo longitudinal do rio maiores do que 60 km. Estas informações apresentam implicações formidáveis porque as características hidrodinâmicas apresentadas na análise (uma espécie de zona de mistura onde ocorrem as renovações superficiais das águas mais rápidas ou dinâmicas). Esta informação fornece um dado valioso sobre a física ou distribuição do escoamento no eixo longitudinal.

7) Com base em outros estudos da literatura regional sobre o Alto, Médio e Baixo Rio Araguari (flúvio-marinho), propomos a classificação de um novo trecho denominado de Araguari Estuarino, compreendido entre os últimos 60 km antes da foz e a foz, com base nas características das zonas de mistura especiais que empregam na qualidade da água diferenciações extraordinárias quando comparadas com os demais trechos do rio Araguari. As implicações desta proposta são as novas formas de abordagem metodológicas para analisar objetivamente estes ecossistemas aquáticos diferenciados e que sofrem influência da pororoca ou dos remansos de marés no sentido jusante para montante apresentam-se complexos para compreendê-los;

8) O ineditismo da abordagem estocástica desta investigação apresenta uma contribuição considerável sobre o ecossistema aquático do Baixo Rio Araguari e Araguari Estuarino, pois lança luz sobre como estes ambientes respondem qualitativamente e quantitativamente aos efeitos das marés e hidrológicos, considerando os efeitos naturais e antrópicos aqui discutidos.

Referências Bibliográficas

- ANA, 2012. Agência Nacional de Águas [WWW Document]. Hidroweb. URL <http://hidroweb.ana.gov.br/>
- APHA - American Public Health Association, AWWA - American Water Works Association, WEF - Water Environment Federation, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th ed. APHA, Washington.
- Ayres, M., Ayres-Jr, M., Ayres, D.L., Santos, A.A.S., 2007. Bioestat 5.0: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas, 5th ed. Sociedade Civil Mamirauá, Belém/PA.
- Azevedo, I.C., Duarte, P.M., Bordalo, A. a., 2008. Understanding spatial and temporal dynamics of key environmental characteristics in a mesotidal Atlantic estuary (Douro, NW Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76, 620-633.
- Bastos, A.M., 2010. Modelagem de Escoamento Ambiental como Subsídio à Gestão de Ecossistemas Aquáticos no Baixo Igarapé da Fortaleza - AP.
- Borcard, D., Gillet, F., Legendre, P., 2011. Numerical Ecology with R. Springer, New York.
- Boyer, J.N., Kelble, C.R., Ortner, P.B., Rudnick, D.T., 2009. Phytoplankton bloom status: Chlorophyll a biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA. *Ecological Indicators* 9, S56-S67.
- Brasil, 2005. Resolução CONAMA nº 357 - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
- Brito, D.C., 2008. Aplicação do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2Kw em Grandes Rios: O Caso do Alto e Médio Araguari – AP.
- Bárbara, V.F., Cunha, A.C., Rodrigues, A.S. de L., Siqueira, E.Q. de, 2010. Monitoramento sazonal da qualidade da água do rio Araguari / AP. *Revista Biociências* 16, 57-72.
- Calijuri, M.C., Cunha, D.G.F., Queiroz, L.A., Moccellini, J., Miwa, A.C., 2008. Nutrients and chlorophyll-a concentrations in tropical rivers of Ribeira de Iguape Basin, SP, Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia* 20, 131-138.
- Capo, S., Sottolichio, a., Brenon, I., Castaing, P., Ferry, L., 2006. Morphology, hydrography and sediment dynamics in a mangrove estuary: The Konkoure Estuary, Guinea. *Marine Geology* 230, 199-215.
- Chung, E.G., Bombardelli, F. a., Schladow, S.G., 2009. Modeling linkages between sediment resuspension and water quality in a shallow, eutrophic, wind-exposed lake. *Ecological Modelling* 220, 1251-1265.
- Costanza, R., Arge, R., Groot, R.D., Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Neill, R.V.O., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutttonkk, P., 1997. The value of the world ' s ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253-260.
- Cunha, A.C., Brito, A.U., Pinheiro, L.A.R., Cunha, H.F.A., Brasil-Jr, A.C., 2010. Simulação da hidrodinâmica e avaliação do potencial hidrocínético: Estudo da Foz do Rio Matapi no Baixo Rio Amazonas - Amapá/Brasil. *Revista Brasileira de Energia Solar (RBENS)* 1, 139-148.

- Cunha, A.C., Brito, D.C., Cunha, H.F.A., Schulz, H.E., 2011. Dam Effect on Stream Reaeration Evaluated with QUAL2KW Model: Case Study of the Araguari River, Amazon Region, Amapá State/Brazil. In: Bilibio, C., Hensel, O., Selbach, J. (Eds.), Sustainable Water Management in the Tropics and Subtropics – And Case Studies in Brazil. Fundação Universidade Federal do Pampa, Jaguarão/RS, p. 697.
- Cunha, A.C., Brito, D.C., Junior, A.C.B., Pinheiro, L.A. dos R., Cunha, H.F.A., Santos, E.S. dos, Krusche, A.V., 2012. Challenges and Solutions for Hydrodynamic and Water Quality in Rivers in the Amazon Basin. In: Schulz, H.E., Simões, A.L.A., Lobosco, R.J. (Eds.), Hydrodynamics - Natural Water Bodies. InTech, Rijeka/Croácia, pp. 67-88.
- Cunha, A.C., Cunha, H.F.A., Brasil-Jr, A.C., Daniel, L.A., Schulz, H.E., 2004. Qualidade microbiológica da água em rios de áreas urbanas e periurbanas no Baixo Amazonas: o caso do Amapá. Engenharia Sanitária Ambiental 9, 322-328.
- Cunha, A.C., Souza, E.B., Cunha, H.F.A., 2010. Tempo, Clima e Recursos Hídricos - Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá, 1ª ed. IEPA, Macapá/AP.
- Cunha, E.D.S., 2012. Levantamento Florístico, Dinâmica Espaço-Temporal e Quantificação da Biomassa do Fitoplâncton dos Rios Araguari e Falsino (Amapá-Brasil).
- DiDonato, G.T., Stewart, J.R., Sanger, D.M., Robinson, B.J., Thompson, B.C., Holland, a F., Van Dolah, R.F., 2009. Effects of changing land use on the microbial water quality of tidal creeks. Marine pollution bulletin 58, 97-106.
- Dias, M.B., 2007. Composição e abundância do fitoplâncton do sudoeste da Reserva Biológica do Lago Piratuba (Amapá, Brasil) Composição e abundância do fitoplâncton do sudoeste da Reserva Biológica do Lago Piratuba (Amapá , Brasil).
- Dinehart, R.L., Burau, J.R., 2005. Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river. Journal of Hydrology 314, 1-21.
- Domingues, R.B., Sobrino, C., Galvão, H., 2007. Impact of reservoir filling on phytoplankton succession and cyanobacteria blooms in a temperate estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science 74, 31-43.
- Eletronorte, 1999. Estudos De Inventário Hidrelétrico – Bacia Hidrográfica do Rio Araguari – Estado do Amapá – Relatório Final.
- Gregor, J.E., Marsálek, B., 2004. Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods. Water research 38, 517-522.
- Hach Company, 1998. Turbidímetro portátil, Modelo 2100P - Manual de Operação.
- Hach Company, 2005. DR 2800 - Spectrophotometer - Procedures Manual.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2006. Censo Agropecuário [WWW Document]. URL <http://www.ibge.gov.br/cidadesat>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Censo Populacional [WWW Document]. URL <http://www.ibge.gov.br/cidadesat>
- IEPA - Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, 2004. Diagnóstico Socioambiental Participativo do Projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do Setor Costeiro Estuarino no Estado do Amapá, Diagnóstico Socioambiental Participativo do Projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do Setor Costeiro Estuarino no Estado do Amapá. Macapá.

- Jolliffe, I.T., 2002. *Principal Component Analysis*, Second Edition, 2nd ed. Springer-Verlag New York, New York.
- Julie, R., Yoann, C., Benoît, L., Matthieu, F., Masseur, N., 2010. Classification of worldwide drainage basins through the multivariate analysis of variables controlling their hydrosedimentary response. *Global and Planetary Change*.
- Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Schöngart, J., Cohn-Haft, M., Adeney, J.M., Wittmann, F., 2011. A Classification of Major Naturally-Occurring Amazonian Lowland Wetlands. *Wetlands* 31, 623-640.
- Kazi, T.G., Arain, M.B., Jamali, M.K., Jalbani, N., Afridi, H.I., Sarfraz, R. a, Baig, J. a, Shah, A.Q., 2009. Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: a case study. *Ecotoxicology and environmental safety* 72, 301-309.
- Kim, T.I., Choi, B.H., Lee, S.W., 2006. Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments in the Keum River Estuary, Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68, 515-528.
- Lillebø, a. I., Neto, J.M., Martins, I., Verdelhos, T., Leston, S., Cardoso, P.G., Ferreira, S.M., Marques, J.C., Pardal, M. a., 2005. Management of a shallow temperate estuary to control eutrophication: The effect of hydrodynamics on the system's nutrient loading. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65, 697-707.
- Liu, Y., Guo, H., Yang, P., 2010. Exploring the influence of lake water chemistry on chlorophyll a: A multivariate statistical model analysis. *Ecological Modelling* 221, 681-688.
- Lung, W.-S., 1993. *Water Quality Modeling - Volume III: Application to Estuaries*, 1st ed. CRC Press, Florida.
- Macêdo, J.A.B., 2003. *Métodos Laboratoriais de Análises Físico-Químicas e Microbiológicas*, 2ª ed. Belo Horizonte.
- Markand, S., Bachoon, D.S., Gentit, L., Sherchan, S., Gates, K., 2011. Evaluation of physical , chemical and microbiological parameters of water quality in the Harris Neck estuarine marshes along the Georgia coast. *Marine pollution bulletin* 62, 178-181.
- Mckenna, J., 2003. An enhanced cluster analysis program with bootstrap significance testing for ecological community analysis. *Environmental Modelling & Software* 18, 205-220.
- Mueller, D.S., Wagner, C.R., 2009. Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. In: *U.S. Geological Survey Techniques and Methods 3A-22*. Virginia, p. 72.
- Muste, M., Yu, K., Spasojevic, M., 2004. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation* 15, 1-16.
- Oliveira, L.L., Cunha, A.C., Jesus, E.S., Barreto, N.J.C., 2010. Características Hidroclimáticas da Bacia do Rio Araguari. In: Cunha, A.C., Souza, E.B., Cunha, H.F.A. (Eds.), *Tempo, Clima e Recursos Hídricos - Resultados Do Projeto REMETAP No Estado Do Amapá*. IEPA, p. 216.
- Olsen, R.L., Chappell, R.W., Loftis, J.C., 2012. Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis - literature review and Illinois River watershed case study. *Water research* 46, 3110-22.
- PROVAM, 1990. *Programa de Estudos e Pesquisas nos Vales Amazônicos*. Belém/PA.

- Parsons, T.R., Strickland, J.D.H., 1963. Discussion of spectrophotometric determination of marine pigments with revised equations for ascertaining chlorophylls and carotenoids. *Journal of Marine Research* 21, 155-163.
- Petternelli, L.A., Mello, M.P., 2012. *Conhecendo o R - Uma visão estatística*, 1ª ed. FGV, Viçosa.
- R Development Core Team, 2012. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria.
- Richards, F.A., Thompson, T.G., 1952. The estimation and characterization of plankton populations by pigment analysis. II. A spectrophotometric method for the estimation of plankton pigments. *Journal of Marine Research* 2, 156-172.
- Richter, C.A., Azevedo Neto, J.M., 1991. *Tratamento de Água - Tecnologia Atualizada*. Edgar Blucher, São Paulo.
- Rocha, C., Cabeçadas, G., Brogueira, M.J., 1995. On the importance of sediment-water exchange processes of ammonia to primary production in shallow areas of the Sado estuary (Portugal). *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 29, 265-273.
- Santos, V.F., 2006. *Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto*.
- Silva, W.C., 2011. *Viabilidade econômica do pagamento por serviços ambientais no Estado do Amapá*.
- Souza, L.R.D.E., Cunha, A.C., Barreto, N.J.C., Brito, D.C., 2010. Aplicação do sistema hidrológico IPHS1 no Estudo de Chuva-Vazão em Aproveitamentos Hidrelétricos na Bacia Hidrográfica do Alto e Médio Araguari. In: *Tempo, Clima e Recursos Hídricos - Resultados Do Projeto REMETAP No Estado Do Amapá*. IEPA, Macapá/AP, pp. 97-118.
- Tan, P.-N., Steinbach, M., Kumar, V., 2006. *Cluster Analysis: Basic Concepts and Algorithms*. In: *Introduction to Data Mining*. Addison-Wesley, p. 769.
- Tucci, C.E.M., 2002. *Hidrologia: ciência e aplicação*. UFRGS, Porto Alegre.
- Twilley, R.R., R. Gottfried, R., Rivera-Monroy, V.H., Zhang, W., Montaño Armijos, M., Boderó, A., 1998. An approach and preliminary model of integrating ecological and economic constraints of environmental quality in the Guayas River estuary, Ecuador. *Environmental Science & Policy* 1, 271-288.
- Viana, J.P., 2002. Physical and chemical post-dam alterations in the Jamari River, a hidrelectric-developed river of the Brazilian Amazon. *Hydrobiologia* 472, 235-247.
- Weissenberger, S., Lucotte, M., Houel, S., Soumis, N., Duchemin, É., Canuel, R., 2010. Modeling the carbon dynamics of the La Grande hydroelectric complex in northern Quebec. *Ecological Modelling* 221, 610-620.
- YSI Environmental, 2002. *Operation Manual - YSI 556 MPS*. Yellow Springs/OH.
- Zheng, L., Chen, C., Zhang, F.Y., 2004. Development of water quality model in the Satilla River Estuary, Georgia. *Ecological Modelling* 178, 457-482.

Capítulo 2

Parametrização, Modelagem e Simulação da Hidrodinâmica da Foz do Rio Araguari-Amapá-Amazônia Oriental/Brasil

Parametrização, Modelagem e Simulação da Hidrodinâmica da Foz do Rio Araguari-Amapá-Amazônia Oriental/Brasil

Eldo Silva dos Santos, Alan Cavalcanti da Cunha

Resumo

O presente estudo trata da parametrização hidrodinâmica do escoamento da água no Baixo Rio Araguari na confluência com o Oceano Atlântico no Estado do Amapá, Amazônia Oriental/Brasil. O objetivo da investigação foi quantificar experimentalmente a descarga líquida do Rio Araguari próximo de sua foz e compará-las com simulações numéricas do escoamento ao longo de ciclos de marés semidiurnas, considerando sua variação no eixo temporal e espacial do referido trecho da bacia hidrográfica. A metodologia de investigação consistiu na análise de três forçantes físicas básicas que influenciam a dinâmica do escoamento na região flúvio-marinha do Baixo Rio Araguari: a) forçantes hidroclimáticas sazonais, b) forçantes de marés semidiurnas, e c) influências antrópicas de montante, especialmente os impactos de barragens de Usina Hidrelétrica. Como sub-etapas metodológicas foram analisados parâmetros batimétricos, a variação espacial-sazonal da dinâmica de descarga líquida e detalhamento dos campos de velocidade em um trecho de aproximadamente 60 km de rio. As campanhas de descargas líquidas foram realizadas em quatro etapas trimestrais em sítios localizados estrategicamente como seções de monitoramento. A batimetria do canal foi realizada para a construção da malha computacional aplicada às simulações numéricas de cenários hidrodinâmicos sazonais. Posteriormente foi elaborada uma calibração do modelo pelo método tentativa e erro com uso do sistema de modelagem SisBaHiA, a partir do escoamento bidimensional promediado na vertical (2DH). Quatro cenários hidrodinâmicos foram simulados e comparados com dados experimentais. Desvios padrão dos erros estatísticos foram obtidos para comparar os resultados experimentais e os simulados, os quais variaram entre 11 e 46% e a correlação entre os dados computacionais e de campo entre 83 a 97%. Concluiu-se que os cenários espaço-sazonais simulados representam coerentemente os campos hidrodinâmicos experimentais, os quais indicaram que as perturbações hidráulicas de montante no período de transição cheia-seca (o mais crítico) apresentam influência até 140 km de distância da sua fonte de perturbação. Estes resultados levam a conclusão que efeitos hidrodinâmicos decorrentes da existência de barragens distantes mais de 140 km da foz têm menos influência do que os efeitos climáticos e de marés presentes na foz do rio, sendo estes últimos preponderantes sobre a hidrodinâmica local.

Palavras-chave: impacto de barragem, perturbações hidráulicas, modelo 2DH, cenários espaço-sazonais, SisBaHiA

Hydrodynamics Parameterization, Modeling and Simulation of the mouth of the Araguari River-Amapá-Eastern Amazon / Brazil

Eldo Silva dos Santos, Alan Cavalcanti da Cunha

Abstract

This paper deals with the parameterization of the flow hydrodynamics of natural water in the Lower Araguari River and confluence with the Atlantic Ocean in Amapá State, eastern Amazonia / Brazil. The objective of this investigation was to quantify experimentally the liquid discharge of the Araguari River near its mouth and compare them with numerical simulations of flow over semidiurnal tidal cycles, considering the variation in spatial and temporal axis of that portion of the watershed. The research methodology consisted of analysis of three basic physical forcings that influence the flow dynamics in the region fluvial-marine Lower Rio Araguari: a) seasonal forcing hidroclimáticas, b) semidiurnal tidal forcing, and c) the amount of anthropogenic influences, especially impacts of dams for hydroelectric power plant. As sub-methodological steps were analyzed bathymetric parameters, the spatial-seasonal dynamics of liquid discharge and detailing of velocity fields in a 60 km stretch of river. The field works for to measure the liquid discharges were performed in four steps quarterly in sites located strategically as monitoring sections. The bathymetry of the channel was made for the construction of the computational mesh applied to numerical simulations of hydrodynamic seasonal scenarios. Later it was elaborated a model calibration method by trial and error using the modeling system SisBaHiA from the two-dimensional flow vertically averaged (2DH). Four scenarios were developed hydrodynamic simulations, which were compared with experimental data. Standard deviations of the statistical errors were obtained to compare the simulated and experimental results, which ranged from 11 to 46% and the correlation between the data and computing field between 83-97%. It was concluded that the seasonal space-simulated scenarios represent coherently the experimental hydrodynamic fields, which indicated that the amount of hydraulic disturbances in the transition period full-dry (most critical) have influence until 140 km distance from its source of disturbance. These results lead to the conclusion that hydrodynamic effects arising from the existence of dams more than 140 km distant from the mouth have less influence than the effects of weather and tides present in the mouth of the river, the latter being predominant on the local hydrodynamics.

Keywords: dam impacts, hydraulic disturbances, 2DH model, scenarios, space-seasonal, SisBaHiA

1. Introdução

Estuários são zonas sensíveis de transição entre o ecossistema marinho e o de água doce, onde ocorrem trocas biogeoquímicas que são essenciais para a manutenção da vida aquática no planeta. Estudo mostra que os serviços ambientais prestados pelos estuários eram os mais valiosos por área entre todos os avaliados em estudo de Costanza et al. (1997). Estes valores eram cerca de US\$ 22.832 ha⁻¹.ano⁻¹, dos quais US\$ 21.100 ha⁻¹.ano⁻¹ equivaleriam ao serviço de ciclagem de nutrientes (valores de 1994). Tais números reforçam a importância dos ecossistemas estuarinos e a necessidade de sua conservação.

As trocas geoquímicas que ocorrem entre os rios e solos alagados que os margeiam durante as enchentes são importantes pelo transporte de sedimentos e nutrientes que ocorre nos dois sentidos (Sklar, 1999). E o principal fator que rege esses fluxos de trocas entre rio e margens é a hidrodinâmica, que responde pelo volume, duração, tempo frequência e intervalos entre enchentes. Portanto, estas são variáveis-chaves para o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos e são críticos para a sobrevivência das comunidades de plantas e animais, principalmente em regiões sob efeito de maré. Além disso, a integridade ecológica de ecossistemas fluviais depende da variação do regime de fluxo no qual eles estão adaptados (World Commission on Dams, 2000).

Entre as principais causas das variações hidrodinâmicas de rios está a construção de barragens. As barragens causam impactos no regime hidrológico dos rios em que estão inseridas por controlarem seu fluxo, alterando a extensão e a frequência das inundações (Poff et al., 1997), perda de biodiversidade (World Commission on Dams, 2000), alterações na fauna e flora terrestre e aquáticas (Kingsford, 2000; Thompson & Polet, 2000), interferências na dinâmica das emissões atmosféricas (Weissenberger et al., 2010) e até perturbações e alterações na capacidade de autodepuração ou reoxigenação das águas (Cunha et al., 2011).

Para classificar esses impactos provocados por barragens nos ecossistemas em que estão inseridas, World Commission on Dams (2000) os dividiu em três categorias. Os impactos de primeira ordem referem-se aos causados no meio abiótico, relacionado diretamente com as consequências químicas, físicas e geomorfológicas causadas pelo barramento do rio e alterações hidráulicas. Os de segunda ordem são as alterações na produtividade biológica primária dos ecossistemas e os efeitos na flora fluvial (por exemplo, clorofila-a) e ribeirinha e nos habitats de jusante, como as áreas alagadas. Mudanças na fauna provocadas por efeitos de primeira ou de segunda ordem são classificadas como de terceira ordem, como, por exemplo,

as mudanças em fluxos migratórios de ictiofauna ou diminuição de disponibilidade de fitoplânctons. Note-se que todos esses efeitos estão inter-relacionados. Inúmeros estudos sobre influências de primeira (Phillips et al., 2004; Kim et al., 2006), segunda (Domingues et al., 2007; Cunha, 2012) e terceira ordem (Jiao et al., 2007) vindo tem sido realizados nas últimas décadas.

De acordo com Vörösmarty et al. (2003), cerca de 40% de toda água descarregada pelos rios são interceptadas por barragens e 25% do fluxo de sedimentos das margens para os oceanos é retido pelas mesmas. Isso mostra a dimensão do impacto que a construção de barragens pode causar no ecossistema da bacia em que foram construídas e a importância de se estudar diferentes aspectos físicos e ecológicos de suas influências.

Os sistemas ambientais são altamente complexos devido ao grande número de interações entre os fenômenos físicos, químicos e biológicos. Com efeito, as equações matemáticas que regem tais fenômenos são, em geral, não lineares e necessitam de poderosos *softwares* para sua modelagem mais adequada, de modo que se gere resultados consistentes e robustos para representar a complexidade dos fenômenos envolvidos.

Por este motivo, o uso de modelos em estudos de ecossistemas estuarinos difundiu-se significativamente nas últimas décadas, principalmente com o aumento do poder de processamento dos computadores pessoais (Brush & Harris, 2010). As equações raramente podem ser resolvidas analiticamente, por causa de suas não linearidades e pelas limitações impostas pelas complexas condições de contorno existentes. Desta forma, utiliza-se da abordagem numérica para se obter respostas adequadas e mais condizentes com a realidade observada (Brito, 2008; Bárbara et al., 2010; Cunha et al., 2011, Rosman, 2012).

O uso de modelos para representar a realidade física sempre esteve presente na ciência. Um modelo é uma hipótese de como um sistema funciona (Smith & Smith, 2007; Brush & Harris, 2010). Modelagens de sistemas ecológicos, hidrodinâmicos e biogeoquímicos são muito complexas porque muitas variáveis estão presentes e há inúmeras interações entre elas, o que, normalmente, impossibilita soluções analíticas para os problemas que se apresentam. Além disso, nem todos os fenômenos que ocorrem nesses sistemas são completamente conhecidos e, portanto, as relações matemáticas que relacionam as variáveis (parametrização), em muitos casos, são empíricas e restritas a determinadas condições (Rajar et al., 1997; Smith & Smith, 2007; Lindim et al., 2011).

Outro motivo importante para o uso da modelagem ambiental é o fator econômico, uma vez que modelos calibrados e validados permitem a obtenção de respostas rápidas e com boa aproximação da realidade, o que os tornam ferramentas essenciais para o gerenciamento de sistemas aquáticos e facilita a tomada de decisão (Rajar & Cetina, 1997; Liu et al., 2008).

Por outro lado, estudos desta natureza na Amazônia são extremamente raros. As razões são a dificuldade de logística e operação concernentes ao monitoramento hidrológico ou da qualidade da água em rios desta região (Brito, 2008; Bárbara et al., 2010; Souza et al., 2010). Isso porque estes se apresentam em locais remotos cujas séries históricas de dados hidrológicas são restritas ou inexistentes, como é o caso do Baixo Rio Araguari. Desta forma, os estudos hidrodinâmicos em rios da Amazônia estão apenas em seu estágio inicial, necessitando de aprofundamentos sobre suas características físicas, químicas e biológicas.

Na presente investigação nosso objetivo é a análise de aspectos essencialmente físicos, representados pelo escoamento hidrodinâmico e influenciado pelas condições impostas antrópicas e oceânicas em ambientes tropicais nunca antes estudado com esta abordagem experimental e numérica.

Com base no conhecimento sobre a hidrodinâmica em regiões estuarinas obtidas da literatura e conhecimento prévio de campanhas de campo in loco no Baixo Rio Araguari, visando o entendimento do comportamento da hidrodinâmica para avaliar os sistemas aquáticos dessa região, os seguintes objetivos foram apresentados:

- a) quantificar experimentalmente a descarga líquida (vazão) do Rio Araguari-AP próximo de sua foz em quatro seções de estudo definidas estrategicamente;
- b) determinar experimentalmente as características geométricas (batimétricas) do canal em um trecho de 60 km a partir da sua foz;
- c) modelar e simular o comportamento da hidrodinâmica na foz do Rio Araguari e calibrar o modelo para representação do escoamento através de comparações com curvas de descarga líquida experimentais, utilizando como base os parâmetros físicos das descargas líquidas, batimetria e condições iniciais de marégrafos e constantes harmônicas oceânica.
- d) elaborar cenários sobre o comportamento hidrodinâmico do escoamento com o objetivo de analisar especificamente o alcance da onda de maré ou efeitos de remansos e estimar seus potenciais impactos quando se considera a existência ou construção de barragem a 220km da foz. Para atender a esses objetivos, uma

descrição metodológica detalhada de cada etapa experimental e numérica é descrita a seguir.

- e) com base no objetivo d) elaborar dois estudos de interesse ecológico para a zona estuarina do Rio Araguari acoplados aos resultados da análise hidrodinâmica disponível: i) determinar taxas de renovação superficial das águas com base em informações da qualidade da água e hidrodinâmicas; ii) simular o comportamento da OD x DBO ao longo de um ciclo de maré e período sazonal específico pré-determinado.

Para atender a esses objetivos, uma descrição metodológica detalhada de cada etapa experimental e numérica é descrita a seguir.

2. Material e Métodos

2.1. Descrição da área de estudo

O Rio Araguari apresenta aproximadamente 617 km de extensão, nascendo na Serra da Lombada, no Parque Nacional (PARNA) Montanhas do Tumucumaque, e desaguando no Oceano Atlântico, ligeiramente ao norte da foz do rio Amazonas. Sua bacia é a maior do estado do Amapá/Brasil, com 42.700km² de área de drenagem (Cunha et al., 2011), correspondendo a um terço da área total do estado.

O Rio Araguari apresenta como principais afluentes os rios Mutum, Tajaúí, Falsino, Amapari e Tracajatuba, sendo que o principal é o Amapari, que banha a região onde está localizado os maiores empreendimentos minerais do Estado do Amapá. Na sub-bacia do Médio Araguari (Figura 1), está localizada a Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes (UHECN), primeira barragem na região Amazônica com fins de geração de energia elétrica, instalada há, aproximadamente, 40 anos. Sua capacidade instalada é de 78 MW (Eletronorte, 2012). Neste trecho, está em construção a UHE Ferreira Gomes (252 MW – 17,72 km², Ecotumucumaque, (2010)), com previsão de início da operação em meados de 2014, e em fase de licenciamento ambiental a UHE Cachoeira Caldeirão (219 MW – 47,99 km², Ecotumucumaque, (2011)).

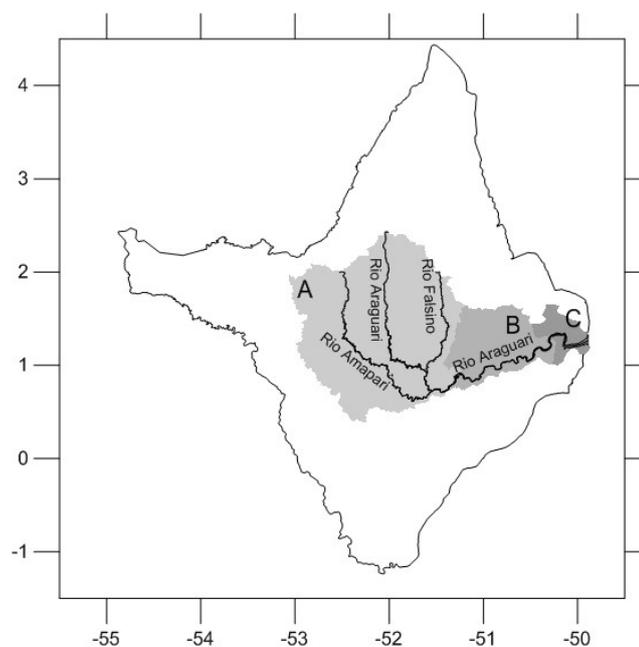


Figura 1: Bacia do Rio Araguari e áreas de drenagens até a UHECN (A) com 32.286 km², entre a UHECN e o início da seção do início do domínio de modelagem (B) com 8.249 km² e da área modelada (C) com 2.165 km².

A figura 2 mostra o comportamento hidrológico do Rio Araguari, localizada na estação fluviométrica de Porto Platon, próximo da cidade de Porto Grande. Observe que o fluxo hidrológico sofre ampla variação sazonal ao longo do ano, com vazão média variando entre 190 m³/s (novembro) e 1916 m³/s (maio) (ANA, 2012). Estas informações são a base de dados hidrológica mais confiável da bacia do Rio Araguari (Cunha et al., 2011), devido a extensão de longo termo da série histórica (ANA, 2012). Contudo sua localização está distante mais 200 km da foz do Rio Araguari. Porém, a base de dados fluviométrica da região de jusante é rara e descontínua e, por esta razão, além dos dados da Estação Fluviométrica de Porto Platon, serão utilizados dados de volume efluente da barragem Coaracy Nunes (Eletronorte, 2011) como referência de comparação entre as vazões de montante e jusante. Por tudo isto, as medidas de descarga líquida do Baixo Rio Araguari são extremamente relevantes para o início de estudos dos ecossistemas aquáticos e sua dinâmica espaço-sazonal.

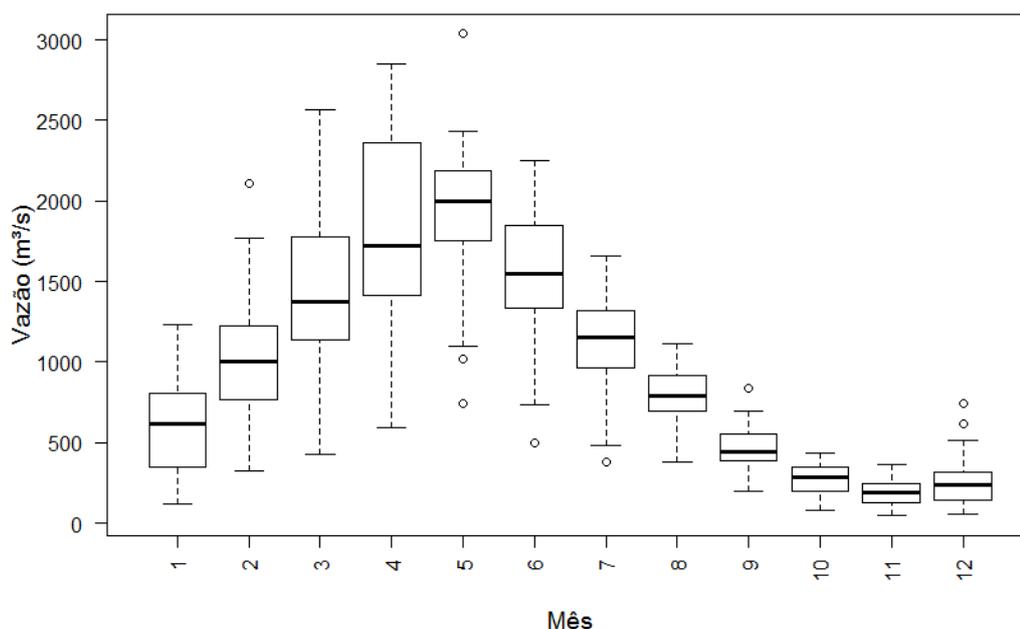


Figura 2: Vazões média do Rio Araguari medidas na estação fluviométrica de Porto Platon (0°42'27"N, 51°26'20"O), a 266 km da foz. Período de medição: janeiro/1952 a agosto/1958 e junho/1972 a dezembro/2011 (ANA, 2012)

O Rio Araguari banha 5 Unidades de Conservação, sendo 3 federais (PARNA Montanhas do Tumucumaque, Floresta Nacional do Amapá, REBio do Lago Piratuba), 1 estadual (Floresta Estadual do Amapá) e 1 privada (RPPN Seringal Triunfo). A declividade do seu canal varia de acordo com o trecho do rio. No trecho superior, entre a confluência com o rio Tajauí e a sede do município de Porto Grande, a declividade é de 40,50 m em 191 km, com gradiente de 0,212 m/km. No trecho médio, entre os municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes, ele apresenta muitas corredeiras, pois o desnível é 54,40 m em 42 km de extensão, com gradiente

de 1,297 m/km. No trecho inferior, onde foi realizada essa pesquisa, o declive estimado é da ordem de 1 m em 224 km, com gradiente de 0,004 m/km (Eletronorte, 1999). Este trecho compreende a sub-bacia do Baixo Araguari e é caracterizado como uma planície flúvio-marinha, com forte presença de atividade de bubalinocultura extensiva. A temperatura do ar na bacia variam 20,0°C a 40,1°C (PROVAM, 1990; Cunha, 2004; Brito, 2008; Bárbara et al., 2010; Cunha et al., 2011).

O volume de controle da modelagem realizada neste trabalho compreende o trecho de 60 km, no Baixo Rio Araguari, que se estende desde próximo a confluência com o rio Tabaco até a foz do Araguari (Figura 3). À margem esquerda deste trecho, encontra-se a Reserva Biológica (REBIO) do Lago Piratuba. A escolha do trecho da foz do Rio Araguari como área de estudo ocorreu por ser a região de maior complexidade hidrodinâmica devido ao conjunto de variáveis forçantes que governam o escoamento flúvio-marinho. O estudo das condições ambientais destes sistemas são pouco conhecidas da área científica e, ao mesmo tempo, apresentam relevância para a região por serem potencialmente sensível a todos os impactos antrópicos da bacia.

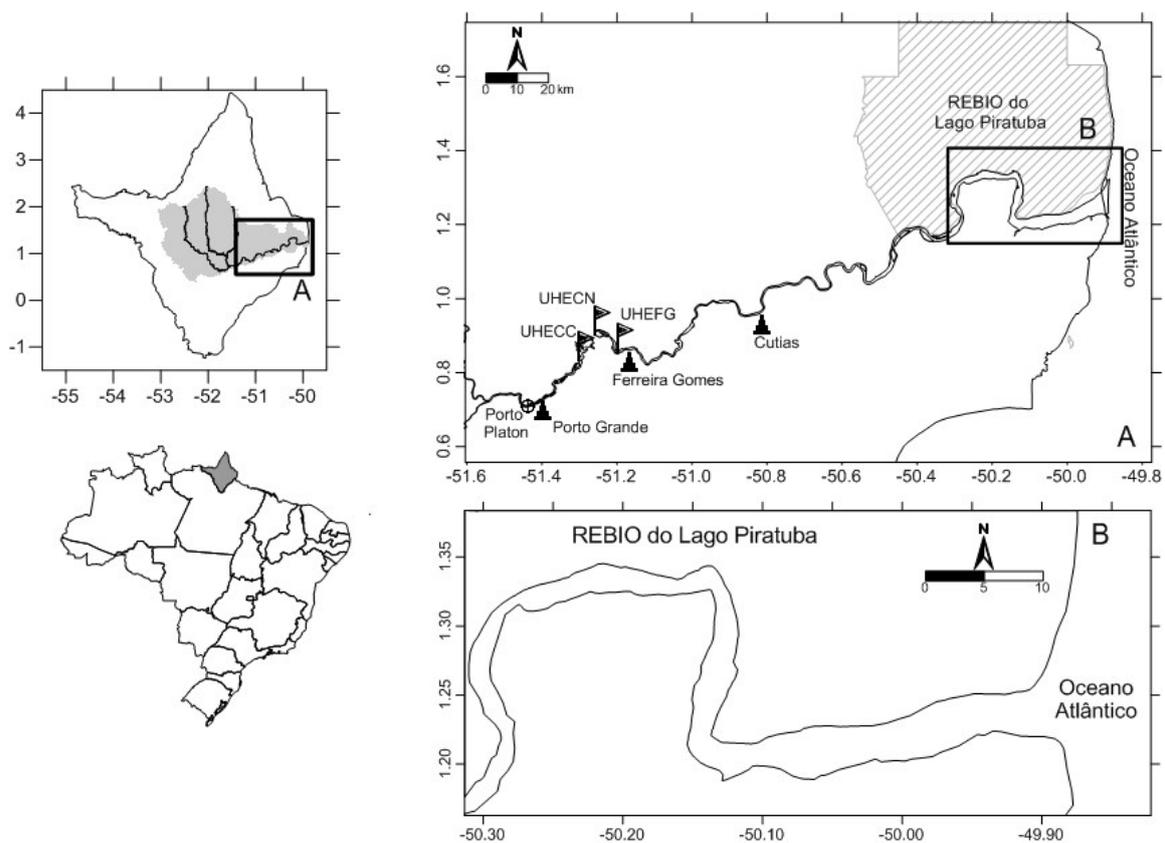


Figura 3: Mapa do Estado do Amapá com representação da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari (esquerda acima). (A) Destaque do trecho do Rio Araguari até sua foz no Oceano Atlântico. (B) Detalhamento da área específica de estudo na foz.

Na figura 3 observa-se a geometria do Rio Araguari e sua conexão com o Oceano Atlântico. O trecho compreendido desde a confluência com o Oceano Atlântico sofre tanto influência de macro-marés semidiurnas (aproximadamente 3 m) quanto a influência da pororoca (tidal bore - ondas de até 3 m acima do nível médio da superfície da água do rio, dependendo do período sazonal hidrológico (Figura 2) que imprime e intensifica a dinâmica ecológica local. Portanto, a variação sazonal ou diária da descarga líquida é o parâmetro chave para qualquer sistema de gerenciamento e uso sustentável desses ecossistemas aquáticos, devido sua real influência sobre toda cadeia alimentar e estrutural básica na coluna d'água ou no leito do rio.

2.2. Medição de descarga líquida

A medição de descarga líquida foi feita utilizando-se um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) RD Instruments, modelo WorkHorse Rio Grande, de 600kHz, em 4 campanhas no ano de 2011: 2/março (transição seca-cheia, maré de quadratura), 4/junho (cheia, maré de sizígia), 8/setembro (transição cheia-seca, maré de quadratura) e 20/dezembro (seca, maré de quadratura), respectivamente, inverno (período chuvoso) e verão (período de estiagem) (Oliveira et al., 2010; Souza et al., 2010).

Por ser uma região do Rio Araguari onde a maré influencia tanto na vazão quanto na variação da direção dos vetores velocidade, cada medição teve a duração aproximada de 12,5h, que corresponde a um ciclo completo de maré semidiurna.

Para determinar a vazão em uma seção, o equipamento ADCP emite ondas sonoras em direção ao fundo do rio que são refletidas pelas partículas em suspensão na água, permitindo ao aparelho determinar a velocidade dessas partículas através do Efeito Doppler. Considera-se que a água se move na mesma velocidade das partículas. Ao curso da travessia, o ADCP divide o transecto em verticais que, por sua vez, são divididas em células de comprimentos definidos pelo usuário. Neste estudo, as células foram definidas com 50 cm de comprimento cada. Simplificadamente, para cada célula, calcula-se o vetor velocidade. A vazão é o resultado da integração da velocidade em toda a área do transecto na qual se quer determinar na seção de estudo (Shen et al., 2010; Cunha et al., 2012).

Um detalhamento explicativo geral sobre método de determinação da vazão utilizando-se o ADCP WorkHorse Rio Grande, 600 kHz, RD Instruments, pode ser consultado em Mueller & Wagner (2009), Muste et al. (2004) e Dinehart & Burau (2005).

Para realizar as medições escolheu-se seções transversais do Rio Araguari que não secassem durante as travessias do barco acoplado ao ADCP. Por esse critério, foram executadas

medições de descarga líquida em 3 seções diferentes nas 4 campanhas, sendo que nas campanhas de março e junho de 2011 estas medidas foram realizadas na mesma seção 1 (figura 4).

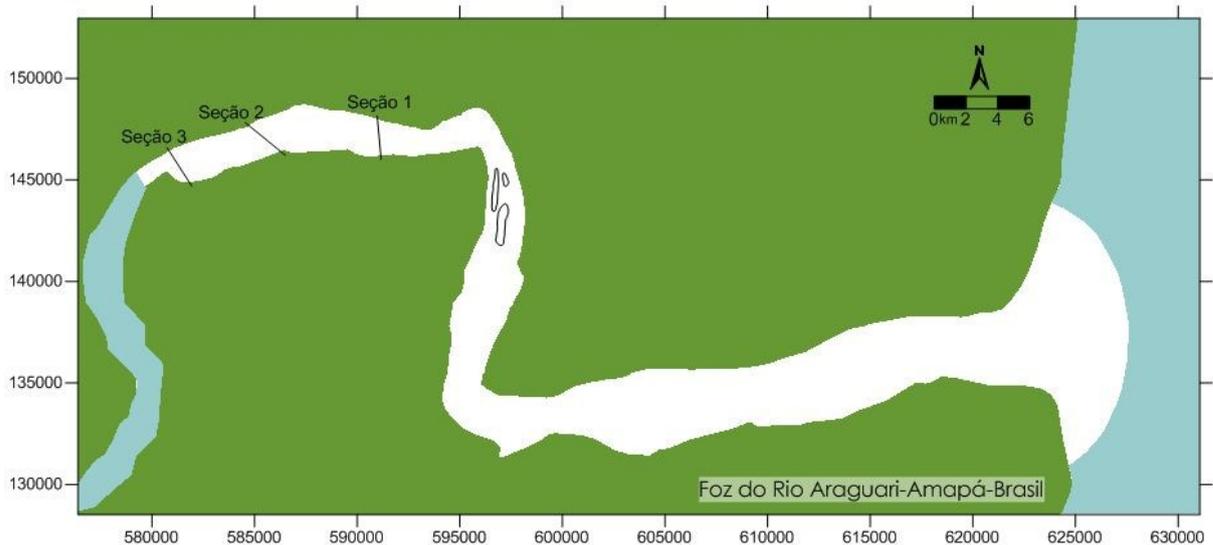


Figura 4: Seções de medição de descarga líquida: Seção 1 – mar/2011 e jun/2011, Seção 2 – set/2011 e Seção 3 – dez/2011.

O ADCP foi instalado na lateral de um de barco de madeira, comum na região amazônica, com um suporte não ferroso para não produzir interferência de campos eletromagnéticos no equipamento. O transdutor operou em nível de 0,60 m submerso. A figura 5 mostra um esquema com a instalação do ADCP. Além das conexões mostradas na figura 5, um GPS modelo GARMIN® 76CSx foi conectado ao computador para se obter as coordenadas geográficas da medição.

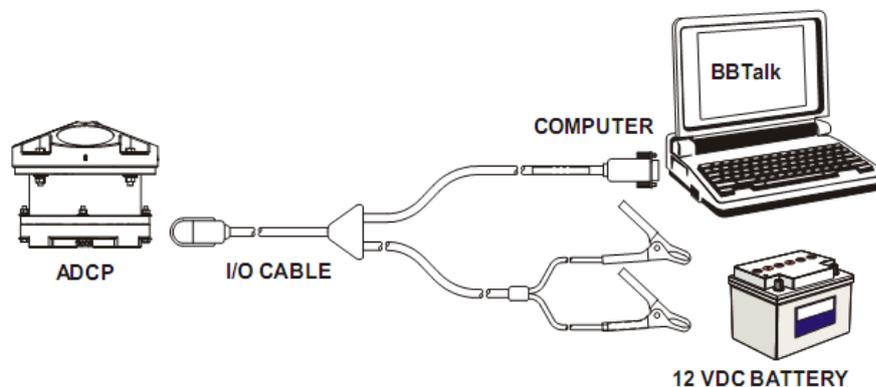


Figura 5: Conexões do ADCP Rio Grande (TELEDYNE RD INSTRUMENTS, 2007).

Na tabela 1 são resumidos os principais equipamentos e acessórios utilizados na medida de descarga líquida traduzida pelos parâmetros hidráulicos, os equipamentos e suas

características funcionais e as referências relacionadas com os respectivos métodos de investigação.

Tabela 1: Resumo das principais atividades deste trabalho

Parâmetros	Equipamentos	Método
Descarga Líquida	ADCP WorkHorse Rio Grande, 600kHz GPS Garmin 76CSx Barco de madeira c, Bateria 65A, Inversor de frequência, Software WinRiver I Computador	Perfilação Doppler (Muste et al., 2004; Dinehart & Burau, 2005; Mueller & Wagner, 2009)
Batimetria	ADP RiverSurveyor M9 Celular Motorola MOTO Q GPS Garmin 76CSx Software RiverSurveyor Live Mobile Marégrafo HOBO U20 WaterLevel Data Logger-U20-001-01	Perfilação Doppler (Sontek/YSI, 2011)
Modelagem Hidrodinâmica	Software SisBaHiA®	FIST3D: Método de Elementos Finitos para modelo 2D promediado na vertical (Cunha & Rosman, 2005; Cunha et al., 2006; Rosman, 2012)

Para se reduzir erros aleatórios durante a medição, foram tomados alguns cuidados como: utilizar suporte do ADCP em material não ferroso, evitar instalar próximo ao motor para reduzir interferências eletromagnéticas, manter a velocidade de travessia o mais constante possível e próxima à velocidade da água, fixar bem o ADCP, de modo que fique perpendicular ao nível da água para não haver deslocamentos do ADCP durante a medição (conhecido como pitch and roll), escolher seção do rio com baixo turbilhonamento, evitando-se curvas e locais com quedas abruptas na profundidade e utilizar piloto que conheça experiente a região de medição (Muste et al., 2004; Aardoom, 2006; Teledyne RD Instruments, 2007)

Em uma travessia o ADCP mede, efetivamente, a região central da seção. Essa é a vazão medida. As vazões de fundo, topo e das margens direita e esquerda da seção de monitoramento são estimadas internamente por cálculo interno do equipamento através de extrapolações. A vazão total quantificada é a soma das vazões de fundo, de topo, das margens

e da vazão efetiva medida. Adotou-se o método exponencial padrão adotado internacionalmente para extrapolação da vazão com o uso deste método (Mueller & Wagner, 2009). Durante a aquisição dos dados, por diversos motivos, o ADCP pode não ter sucesso na leitura correta de algumas células (*badbins*) ou mesmo verticais inteiras (*lost ensembles* ou *bad ensembles*). Quando isso ocorre, as vazões nestas células e verticais são estimadas de acordo com metodologia apresentada em Mueller & Wagner (2009).

Ao final do ciclo de maré medido, exportou-se, do Winriver I® para o software Excel®, tabela com dados como hora de início e fim de cada travessia, vazão total, vazão medida, vazões estimadas de topo, de fundo e de margens esquerda e direita, área molhada, entre outros.

Para calcular a vazão média durante o ciclo de maré semidiurna em que foi feita a medição, a partir da tabela original de dados, interpolou-se linearmente os dados de vazão e construiu-se uma segunda tabela com intervalo constante de 15 minutos entre as travessias. A partir desta tabela, gera-se um gráfico vazão x tempo, onde o volume que passou na seção equivale a área do gráfico. A vazão é calculada dividindo-se o volume pelo tempo total de medição de 12,5 h.

2.3. Batimetria

A batimetria da área de estudo foi um ponto crítico neste projeto. Por questões logísticas, de recursos humanos e equipamentos, não se obteve uma malha densa, principalmente na região mais próxima da foz do Rio Araguari. Contudo, considera-se como razoável a estrutura da malha gerada de forma que se apresentasse as principais características reais da geometria e da geomorfologia de fundo do canal.

A batimetria da região de estudo foi feita nos dias 24 e 25/maio/2012 com um Perfilador Acústico Doppler (ADP – Acoustic Doppler Profiler) SonTek RiverSurveyor, modelo M9, figura 6, com quatro transdutores de 3MHz e quatro de 1MHz. Os dados de profundidade são obtidos por um feixe acústico vertical de 0,5MHz (Sontek/YSI, 2011).

De modo semelhante ao do ADCP, instalou-se o ADP na lateral de uma lancha de alumínio com 8m de comprimento. A configuração do equipamento e dos dados da medição foram feitos via conexão *bluetooth* com um aparelho celular através do software RiverSurveyor Live Mobile, versão 3.00.0.00 que acompanha o ADP M9.

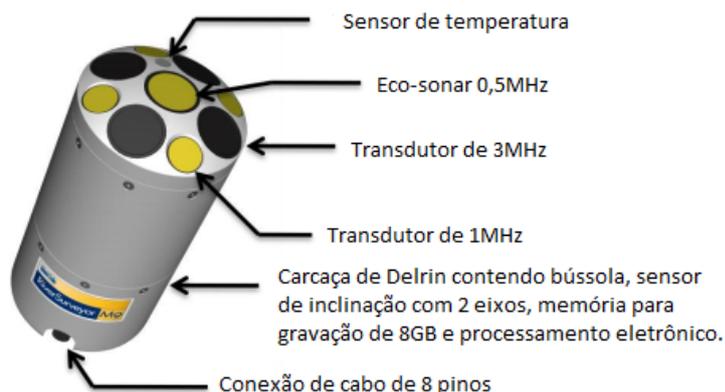


Figura 6: ADP SonTekRiverSurveyor, modelo M9 (Adaptado de Sontek/YSI, 2011)

Para se avaliar correções do nível da água, foram instalados um marégrafo (R0) e duas réguas de nível (R1 e R2) ao longo do trecho de estudo, conforme figura 7. Porém, não se dispunha de nenhum nível de referência nem um aparelho GPS diferencial (DGPS) para ajustar medidas das réguas com o marégrafo. Para estimar a informação sobre as características físicas de inclinação do canal utilizou-se de um procedimento alternativo.

Segundo Eletronorte (1999), há um desnível de aproximadamente 1m em 224km, desde a sede do município de Ferreira Gomes até a foz do Rio Araguari, resultando em gradiente médio aproximado de 4,5mm/km neste trecho.

Neste caso, utilizou-se este gradiente aproximado para estimar a declividade média entre as medidas de R₀, R₁ e R₂, ajustando-se as leituras das réguas e do marégrafo para que na maré vazante, a diferença média na leitura de R₁ (distante 11km de R₀) para R₀, para um mesmo horário, fosse de 5cm e de R₁ para R₂ (distantes 10km entre si), de 4,5cm, respectivamente.

Ajustadas as curvas do nível d'água medidas em R₀, R₁ e R₂, procedeu-se com as medições da profundidade percorrendo-se a área de estudo, conforme mostra a figura 7. O trecho medido a partir de R₂ teve uma densidade de medições muito baixa e nos 20km mais próximos da foz não foi realizada nenhuma batimetria porque a expedição para este trabalho de campo estava limitada a 2 dias e havia o risco de acidentes devido a presença diária da pororoca. Deste modo, além da pororoca, era uma área de risco para navegação por conta dos bancos de areia e não se dispunha de guias nem pilotos disponíveis para um período maior de medições.

Para este trecho mais crítico, estimou-se as profundidades em alguns pontos a partir de informações obtidas de pescadores locais, com profundo conhecimento da região. A profundidade da zona marinha do volume modelado foi obtida em Gallo & Vinzon (2005). O

nível de referência adotado equivale à altura de 2,5 m acima do leito do rio no ponto onde se instalou R_0 . A figura 7 mostra as linhas usadas na aquisição dos dados de batimetria.

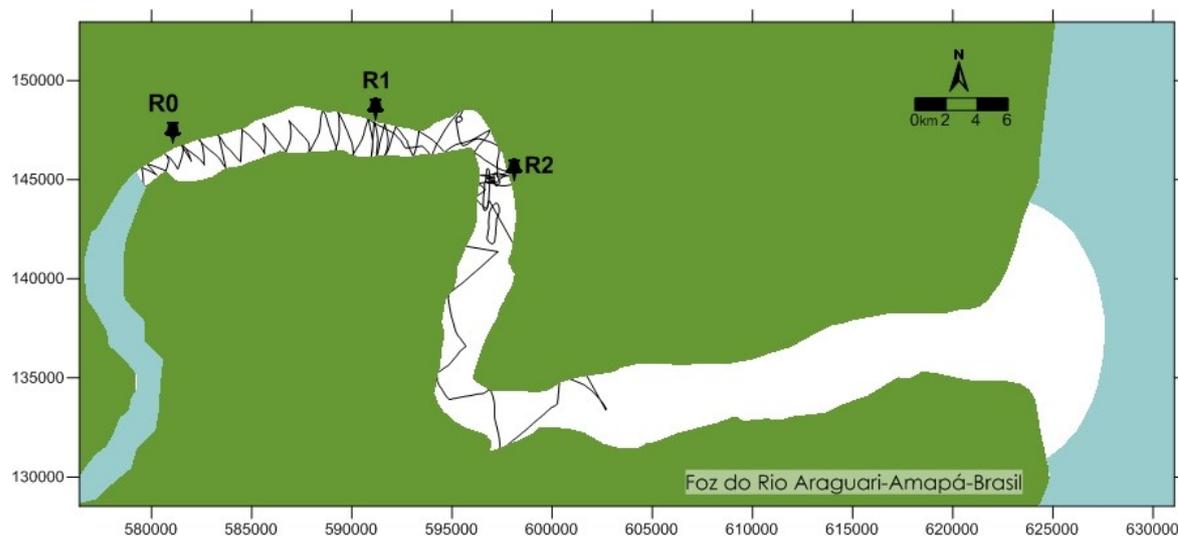


Figura 7: Linhas das medições batimétricas e localizações do marégrafo (R_0 : $1^{\circ}19'22.87''N$, $50^{\circ}16'51.19''O$), régua 1 (R_1 : $1^{\circ}20'23.41''N$, $50^{\circ}11'1.33''O$) e régua 2 (R_2 : $1^{\circ}18'14.70''N$, $50^{\circ}7'5.05''O$)

A sistemática de interpolação da batimetria foi feita através da técnica de kriging, que usa um algoritmo geoespacial multivariado baseado em regressão de mínimos quadrados para explicar a dependência espacial entre as observações e realizar as previsões espaciais de interpolação (Goovaerts, 2000).

2.4. Modelo SisBaHiA

As circulações hidrodinâmicas que ocorrem em rios, em especial na foz, dependem de dinâmicas de maré, que são oscilatórias, não permanentes e regidas por equações diferenciais não-lineares e complexas que necessitam de soluções numéricas para que a modelagem dessas regiões sejam mais fiéis aos dados observados (Rosman, 2012; Gleizon et al., 2003).

Este trabalho utilizou para simular a circulação hidrodinâmica da foz do Rio Araguari o módulo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA, em que os valores de elevação da superfície livre são calculados através de modelamento bidimensional promediado na vertical (Rosman, 2012).

O SisBaHiA utiliza um modelo hidrodinâmico de linhagem FIST (Filtered In Space and Time), otimizado para corpos naturais. O modelo FIST3D (versão 3D do FIST) resolve a equação completa de Navier-Stokes com aproximação para equações de águas rasas. Tais equações podem ser usadas quando as escalas dos movimentos horizontais são pelo menos 20

vezes maiores que a profundidade (Rosman, 2012; Banda & Seaid, 2012). Para o trecho de estudo essa aproximação é válida, uma vez que a profundidade máxima medida foi de cerca de 9 metros contra uma largura mínima de 850 metros. Portanto, esta razão de aspecto é de mais de 90 vezes, podendo ser seguramente considerado como águas rasas.

A discretização espacial do modelo permite ótimas aproximações de contornos e batimetrias complexas, que são características em corpos d'águas estuarinos. Para a discretização espacial, o SisBaHiA® utiliza o método de elementos finitos para resolver numericamente as equações. Esse método consiste em discretizar o domínio da modelagem em unidades finitas (elementos) em que as equações da conservação da energia e de momento que governam a circulação hidrodinâmica são resolvidas numericamente para cada elemento e as variáveis de saída de um elemento são valores de entrada nos elementos adjacentes, para cada intervalo de tempo. A discretização temporal do modelo SisBaHiA é via um esquema implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem (Rosman, 2012; Cunha & Rosman, 2005). A figura 8, representa o sistema de coordenada do modelo 2DH e o perfilamento da velocidade promediada na vertical.

Observe que na figura 8 a cota ou profundidade considera um valor de referência negativo (z) por apresentar orientação contrário ao referencial da profundidade. Além disso, é possível verificar na mesma figura que o perfil característico da velocidade é aproximado por um perfil linear na vertical. Ambas as curvas são equivalentes em relação à média vertical (Rosman, 2012).

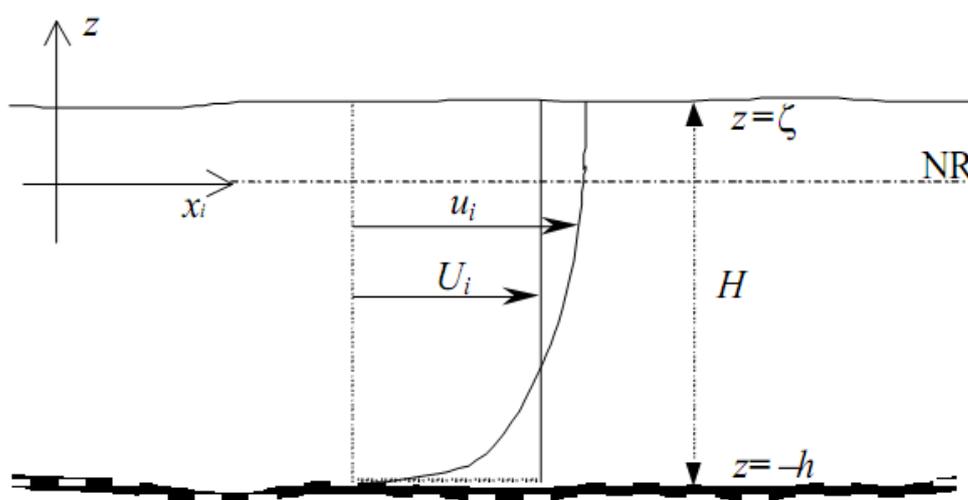


Figura 8: Sistema de coordenada do modelo 3D e 2DH. NR é o nível de referência, U_i é a velocidade integrada na vertical, u_i é a velocidade do modelo 3D e varia com a profundidade, ξ é a elevação da superfície livre da água, h é a profundidade obtida através da batimetria, H é a profundidade instantânea ($= \xi + h$) – adaptada de Rosman (2012).

Para o módulo 2DH, a equação da continuidade do volume de controle, para batimetria permanente no período de modelagem, ou seja, $z = -h(x,y)$, é (Eq. 1):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \underbrace{q_P - q_E \pm q_I}_{\sum q} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

ζ : elevação da superfície da água;

U : velocidade no eixo x ;

V : velocidade no eixo y ;

H : profundidade instantânea;

q_P : efeitos devidos a precipitação;

q_E : efeitos devidos a evaporação;

q_I : efeitos devidos a infiltração;

As equações para a quantidade de movimento no modelo 2DH, respectivamente nas direções x e y são (equações 2 e 3):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\Phi \text{sen}\theta V - \frac{U}{H} \sum q \end{aligned} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B) + 2\Phi \text{sen}\theta U - \frac{V}{H} \sum q \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

U : velocidade no eixo x ;

V : velocidade no eixo y ;

ζ : elevação da superfície da água;

H : profundidade instantânea;

ρ_o : densidade da água promediada na vertical.

ρ_o : densidade constante de referência;

g : aceleração da gravidade;

$\bar{\tau}_{ij}$: tensor de tensões turbulentas;

τ_i^s : tensão de atrito na superfície livre;

τ_i^s : tensão de atrito na superfície livre;

Φ : velocidade angular de rotação da Terra;

θ : ângulo de latitude;

$\sum q$: somatória dos efeitos devidos à precipitação, evaporação e infiltração.

A descrição detalhada do modelo matemático com as equações bidimensionais para águas rasas pode ser obtida em Cunha & Rosman (2005). Para o modelo numérico as equações gerais de conservação da energia e do momento, bem como seus desenvolvimentos e considerações de desenvolvimento estão na referência Rosman (2012).

2.4.1. Discretização do Rio – Construção da Malha

O método de elementos finitos utilizado para resolver o modelo numérico através do SisBaHiA pressupõe a criação de malha que discretize a geometria física da região modelada. A esse processo de transformação do sistema físico real para um sistema computacional virtual denomina-se de discretização da malha (Rosman, 2012).

Para a construção dessa malha utilizou-se os softwares Google Earth®, versão 6.1.0.5001 (Google, Inc.), Surfer®, versão 10.1.561,64-bits (Golden Software, Inc.), Argus ONE®, versão 4.2.0q (Argus Holdings Ltda.), conforme o fluxograma apresentado na figura 9:

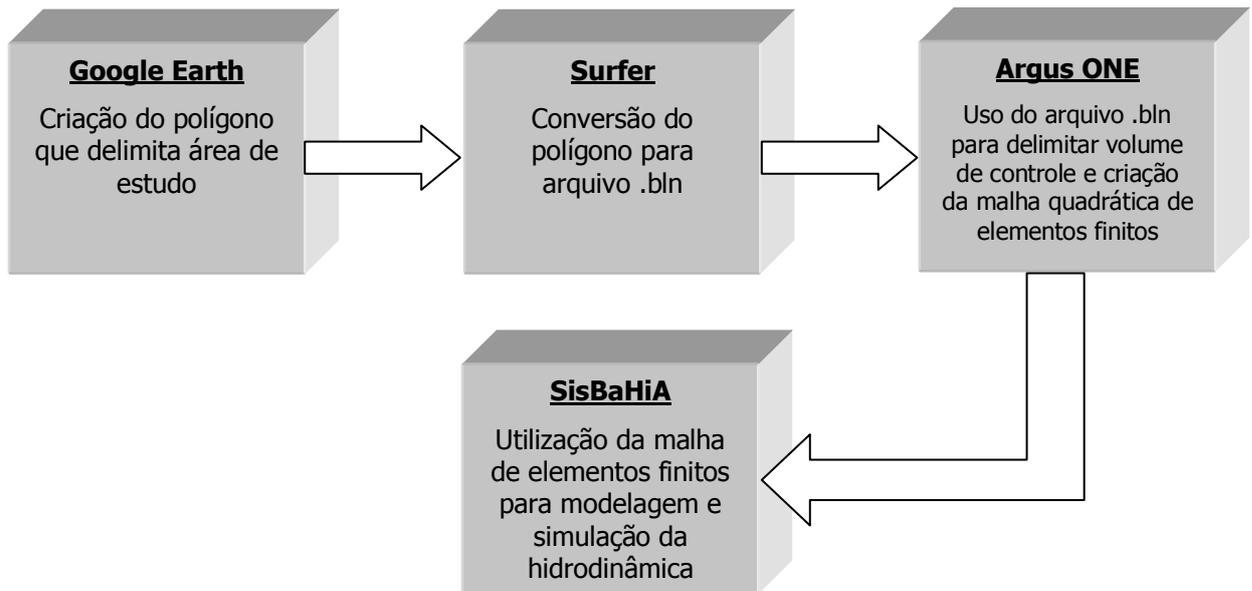


Figura 9: Fluxograma de criação da malha de elementos finitos

Na construção da malha, não foram considerados os afluentes do Rio Araguari na região do estudo uma vez que o maior deles, o rio Tabaco ($1,32^{\circ}$ N, $50,28^{\circ}$ O), tem vazão menor que 10% da vazão média do Rio Araguari tanto no período chuvoso quanto no seco (Matos, 2009).

2.4.2. Dados de Entrada e Parametrização do Modelo

O primeiro dado de entrada do modelo SisBaHiA® é a malha de elementos finitos gerada pelo software Argus ONE, com batimetria para cada nó interpolada pelo método de Kriging, a partir das profundidades obtidas em trabalho de campo na região de estudo.

A amplitude da rugosidade de fundo (ϵ) foi considerada constante e igual a 0,0200 m em todos os nós do malha. De acordo com Abbot & Basco (1989), a faixa recomendada de amplitude de rugosidade em leitos com transporte de sedimentos para uso no módulo 2DH do modelo FIST3D é de 0,0070 m a 0,0500 m. Na área de estudo, há predominância de material argiloso e silteoso (Ecotumucumaque, 2010) as quais justificam o presente uso de $\epsilon = 0,02$.

A fronteira aberta da malha numérica são os nós de contorno que fazem limite com o Oceano Atlântico, denominada também de fronteira oceano. No modelo FIST3D, para a fronteira aberta em que há condições de efluxo, é suficiente fornecer a elevação da superfície livre nos nós da fronteira. Para a previsão da maré, foram utilizadas as constantes harmônicas da estação maregráfica Ponta Guará, conforme tabela 2.

Tabela 2: Constantes harmônicas da estação maregráfica Ponta Guará. Latitude: 1,217° N, 49,883° O. NR: instalada na base do antigo farol. Nível médio: 240 cm acima do NR. Maré semidiurna. (FEMAR, 2012)

Constante Harmônica	Período (seg)	Amplitude(m)	Fase (°)
MSf	1275721	0.488	28
MN4	22569	0.108	107
M4	22357	0.272	132
OO1	80302	0.019	132
MO3	30191	0.016	132
MK3	29438	0.026	145
MS4	21972	0.133	166
mu2	46338	0.114	189
SN4	22177	0.048	193
Q1	96726	0.033	205
O1	92950	0.063	251
2N2	47258	0.049	269
K1	9895	0.104	272
P1	86637	0.034	272
N2	45570	0.366	292
nu2	45454	0.071	292
Mm	2380713	0.307	297
L2	43890	0.063	306
M2	44714	1.527	315
M3	29809	0.014	323
M1	89400	0.013	330
J1	83155	0.021	341
S2	43200	0.401	354
K2	43082	0.109	354
T2	43259	0.024	354

Contornos de terra representam as margens do rio e os nós com afluxo e efluxo ao domínio de modelagem. Para o modelo FIST3D, normalmente a prescrição de fluxos ou velocidades estão associadas aos contornos terrestres enquanto que aos contornos de água estão relacionados à elevação da superfície livre (Rosman, 2012).

O SisBaHiA permite a definição de 10 tipos ou classes de nós para as fronteiras abertas, de acordo com a característica dos dados de entrada impostos na parametrização (fluxo ou velocidade nodal, ângulo normal ao nó e talude da fronteira).

A descrição detalhada dos tipos de nós pode ser vistas em Rosman (2012). Para os nós das margens, impôs-se que o fluxo normal é nulo. O FIST3D calcula o ângulo entre a direção normal ao nó e o eixo x, a partir da geometria e batimetria da malha.

Na seção onde o rio desemboca no domínio modelado (fronteira rio, figura 10) impôs-se nós do tipo 9. No FIST3D, esse tipo de nó permite que haja extravasamento do fluxo tanto quando há afluxo (maré vazante) quanto efluxo (maré enchente) e são fornecidos explicitamente o ângulo entre a direção normal e o eixo x e o talude na direção normal para cada nó da seção. A velocidade tangencial é considerada nula para esse tipo de nó.

Talude pode ser definido como o declive da superfície de fundo do rio na direção normal ao nó de fronteira. O valor de talude informado para um nó no SisBaHiA representa a distância horizontal, em metros, para cada metro de profundidade no nó, conforme figura 10.

A onda de maré que adentra rio acima é amortecida na medida em que se desloca para montante. Ao atingir a fronteira rio, em condições naturais, a onda continua avançando rio acima até ter sua energia dissipada pelas tensões de fundo e inerentes aos próprio escoamento, e também pelo atrito das margens e presença de barreira hidráulica (Vincent et al., 2002).

Porém, como nosso modelo é limitado espacialmente a 60 km na foz do Araguari, para reproduzir essa dinâmica da onda de maré, fez-se a parametrização variando-se o talude nos nós da fronteira rio. Para isso, aumenta-se o talude nos nós da fronteira em cada rodada de simulação e compara-se os resultados de vazão na seção onde foram realizadas as medições de campo. Dessa forma, pode-se avaliar a partir de qual distância horizontal normal ao nó a onda de maré se dissipa naturalmente. A este parâmetro, chamaremos de comprimento de intrusão da onda (L). A relação entre talude e o comprimento de intrusão da onda é mostrada na figura 10.

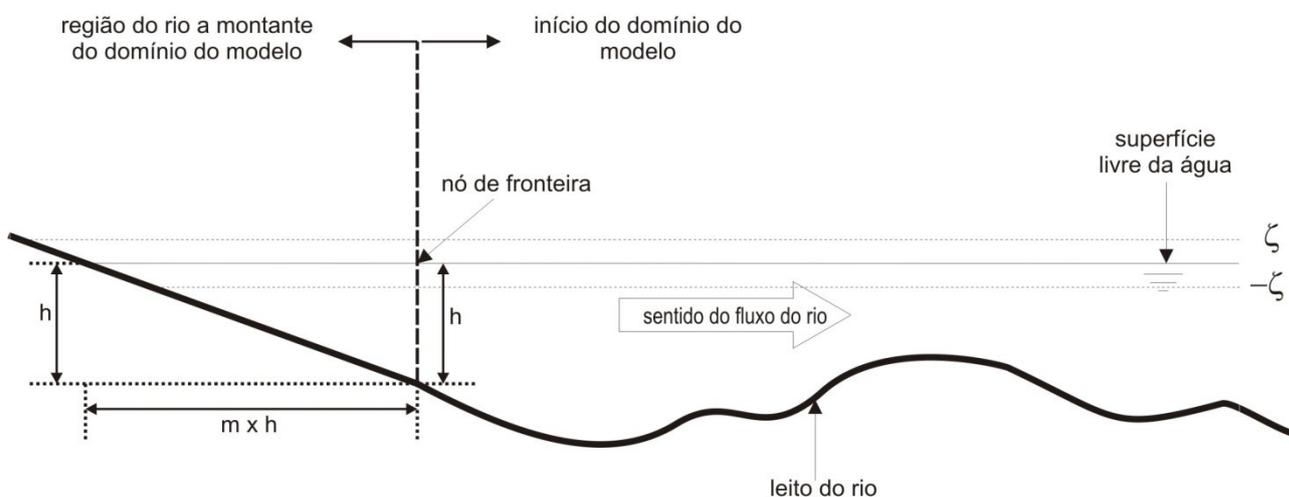


Figura 10: Corte longitudinal próximo da fronteira rio. O esquema de contorno permeável. 'h' é a cota de alagamento do nó de fronteira, 'm' é o talude e 'm x h' é o comprimento de intrusão da onda (L).

Para cada um dos quatro cenários simulados, os dados de parametrização do talude que foram alterados na avaliação do comprimento de intrusão da onda.

No modelo 2DH do SisBaHiA®, as condições iniciais que devem ser fornecidas ao modelo para cada nó são: elevação, velocidade em $x(U)$ e velocidade em $y(V)$. Adotaram-se valores

iguais à zero para essas variáveis em todos os cenários, o que fez com que os resultados das primeiras 3 horas simuladas apresentaram comportamento de regime transiente.

Para se reduzir os erros entre valores medidos e simulados, os tempos iniciais das simulações foram definidos pelo menos 30 horas antes do primeiro dado de descarga líquida medido (*spin up*). Garante-se, assim, que nos horários em que se obteve os dados de campo, para efeito de comparação, a simulação já esteja em regime permanente e sem as perturbações numéricas inerentes aos processos de modelagem.

Desta forma, todas as simulações foram feitas para um intervalo de tempo de 4 dias com passo de tempo de 100 segundos. Este procedimento evitou o surgimento de dados espúrios, falsa difusão ou oscilações numéricas. A tabela 3 resume basicamente as condições iniciais e de contorno utilizadas na parametrização dos cenários modelados.

Tabela 3: Resumo das condições iniciais e de contorno usados na parametrização dos cenários modelados

Período	Tempo inicial do modelo	Maré	Ângulo normal de afluxo/defluxo da fronteira-rio	L (km) Em relação à boca do rio
Cenário 1 Transição Seca-Cheia	0:00h de 01/março/2011	Quadratura	-136°	70, 120 e 140
Cenário 2 Cheia	0:00h de 03/junho/2011	Sizígia	-136°	65, 70, 80, 120
Cenário 3 Transição Cheia-Seca	0:00h de 07/setembro/2011	Quadratura	-136°	100, 120, 140, 160, 180
Cenário 4 Seca	0:00h de 19/dezembro/2011	Quadratura	-136°	100, 120, 140, 180

2.4.3. Análise Estatística - Erros entre Experimento x Simulação

Para quantificar o erro e comparar os resultados simulados no SisBaHiA com as medições de descarga líquida realizadas em campo, foram utilizados 3 parâmetros estatísticos: a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o desvio padrão geral dos erros (STD) e o coeficiente de correlação (r). Os dois primeiros parâmetros avaliam o erro entre medido e simulado. Quanto mais próximo de zero são seus valores, mais os dados medidos e simulados se assemelham (Chung et al., 2009). O coeficiente de correlação avaliará o grau de associação entre os dados de campo e os simulados (Van Emden, 2008). Quanto mais próximo de 1, maior a correlação. As equações do RMSE, do STD e de r são mostradas a seguir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \cdot \frac{1}{\bar{O}} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$STD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}}{n \cdot \bar{O}} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$r = \frac{n(\sum_{i=1}^n S_i \cdot O_i) - (\sum_{i=1}^n S_i)(\sum_{i=1}^n O_i)}{\sqrt{n(\sum_{i=1}^n S_i^2) - (\sum_{i=1}^n S_i)^2} \cdot \sqrt{n(\sum_{i=1}^n O_i^2) - (\sum_{i=1}^n O_i)^2}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

S_i : Valores simulados no tempo i ;

O_i : Valores observados/medidos em campo no tempo i ;

\bar{O} : Média aritmética dos valores observados/medidos em campo no tempo i ;

n : Número de valores medidos

Estes parâmetros estatísticos são de grande utilidade para quantificar e avaliar o comportamento espaço-sazonal das diversas variáveis estudadas. De posse destes parâmetros é possível avaliar desde os erros sistemáticos dos desvios entre os valores simulados e experimentais até o grau de associação entre os mesmos ao longo de um período ou com a distância (Smith & Smith, 2007).

2.4.4. Calibração

A calibração é a etapa no processo de modelagem que serve para ajustar os resultados simulados com os dados experimentais. Esse ajuste é feito através da variação de parâmetros físicos do domínio modelado, dentro de faixa de valores realistas (Soto, 2004).

Para se obter a calibração satisfatória em modelos hidrodinâmicos no SisBaHiA®, alguns passos importantes são necessários: (i) dispor das escalas características dos fenômenos e escalas de discretização compatíveis; (ii) representar adequadamente a geometria do domínio modelado; (iii) impor boas condições de contornos; (iv) utilizar variações adequadas de nível da água; (v) ajustar parâmetros de turbulência para calibrar os valores de velocidade das correntes (Rosman, 2001).

Fragoso-Jr et al.(2009) descrevem que os parâmetros do modelo são ajustados de forma que a saída do modelo se aproxime dos dados observados. Portanto, a calibração do modelo pode ser realizada por tentativa e erro ou pelo uso de algoritmos que calibram automaticamente os parâmetros, utilizando funções objetivas que minimizam a diferença entre os valores calculados e observados. No Alto e Médio Rio Araguari, Bárbara (2006) calibrou o modelo Qual2E (qualidade da água) com tentativa e erro. Brito (2008) calibrou o modelo Qual2kw (também de qualidade da água) utilizando-se de um dispositivo automático conhecido como algoritmo genético de minimização dos erros. No presente estudo a calibração foi realizada com tentativa e erro. Contudo, uma validação do modelo ainda não foi realizada devido a inexistência de dados pretéritos para verificação, o que poderá ser realizado em uma próxima investigação com dados observados.

Assim, técnicas estatísticas foram utilizadas para as estimativas de erros do modelo. Para tanto, utilizou-se parâmetros como o coeficiente de correlação e análises de erro (RMSE e STD). Estas técnicas podem revelar aspectos interessantes para a compreensão das restrições, limitações e vantagem dos modelos (Fragoso-Jr et al., 2009).

Neste trabalho, como comentado anteriormente, as limitações das atividades de campo reduziram em algum grau a capacidade de se obter dados precisos da batimetria e, especialmente dos níveis d'água de referência para o elevação da superfície d'água, que por sua vez são extremamente sensíveis ao processo de simulação dos cenários de descargas líquidas. É importante ressaltar também que a batimetria influencia significativamente em valores locais de velocidade e que a variação dos níveis d'água na fronteira oceano indica como os fluxos de água se comportam dentro do domínio de controle. Portanto, possíveis diferenças entre dados simulado e medidos podem ser explicados pela imprecisão dessas diferenças.

Com efeito, durante a análise dos erros, é pertinente mencionar que as incertezas devidas às imprecisões dos parâmetros de entrada do modelo, são os principais fatores a serem considerados na aplicação e aprendizagem da ferramenta computacional. Portanto, as curtas séries temporais das variáveis concernentes às harmônicas das marés, ausência de estações fluviométricas na região de jusante estudada, desconhecimento sobre as forçantes hidroclimáticas locais, desconhecimento sobre o uso e ocupação do solo (em termos de suas consequências físicas) como a construção e operação de hidrelétrica e bubalinocultura necessitam ser melhor compreendidas para entender suas influências na hidrodinâmica da foz do Araguari.

Tais variáveis são muito difíceis de obter sem uma complexa rede de monitoramento e atualização dos dados.

3. Resultados

3.1. Descarga Líquida

Os valores medidos de descarga líquida são apresentados nas figuras 11 e 12.

Em março/11, período sazonal que consideramos como transição entre o período seco e o período seco-cheia, em maré de quadratura, o fluxo enchente durou 2 h e o fluxo vazante, 10,5 h (razão enchente/vazante de 0,19). A vazão máxima vazante foi de 3.848 m³/s e enchente de -1.567 m³/s. Durante o ciclo de maré, a vazão média, integrando a área do gráfico, foi de 2367 m³/s. Em junho, período considerado como cheia, a maré reinante era de sizígia. Durante o ciclo de maré de 12,5 h, o fluxo em direção a montante durou 2,7 h e, correu no sentido contrário por 9,8 h (razão 0,28). A vazão máxima vazante foi de 4.559 m³/s e enchente de -2.800 m³/s. Para esta amostragem, a vazão média no ciclo de maré foi de 2.540 m³/s. Para o período de transição entre cheia e seca, setembro/11, as vazões máxima (vazante) e mínima (enchente) foram, respectivamente, 2.473 m³/s e -4.141 m³/s. A maré lunar reinante era de quadratura. O fluxo enchente teve duração de 3,9h e o vazante, de 8,6 h (razão enchente/vazante de 0,45). A vazão média para este período foi de 650 m³/s. Por fim, no período seco, em dezembro, sob maré reinante de quadratura, a vazão máxima vazante foi de 1.944 m³/s, a enchente, -3.006 m³/s e a média no ciclo de maré foi de 316 m³/s. A maré enchente durou 4 h e a vazante 8,5 h (razão 0,45) (figura 12).

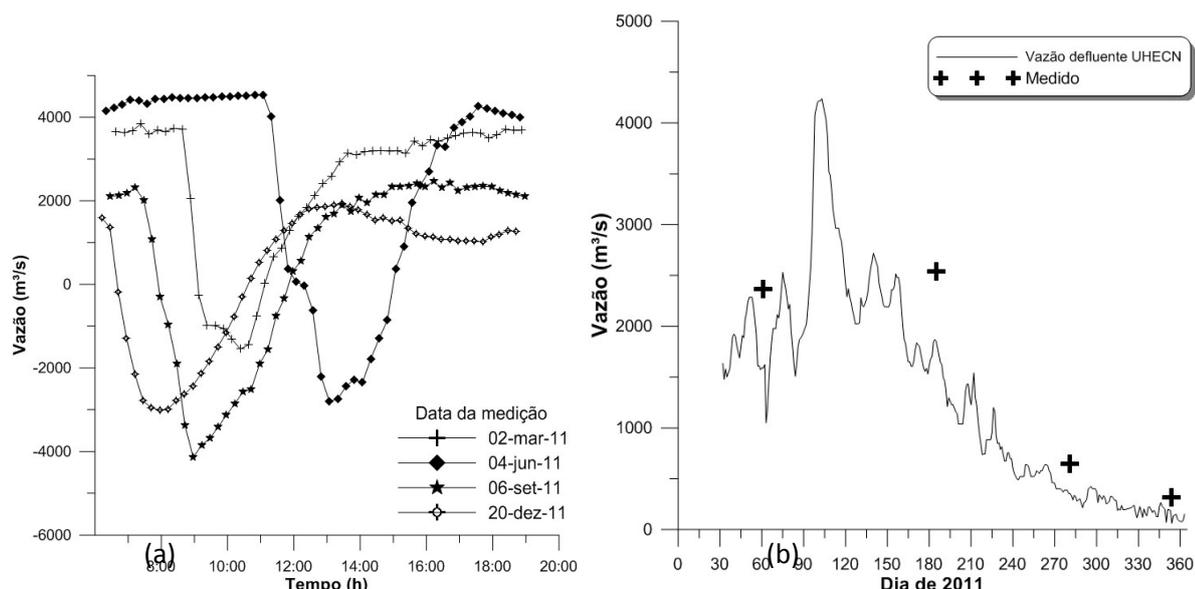


Figura 11: (a) Descarga líquida medida em campo nos períodos transição seca-cheia (02/março/2012), cheio (04/junho/2011), transição cheia-seca (06/setembro/2011) e seco (20/12/2011) na foz do Rio Araguari. (b) Comparação entre vazões médias medidas em seções a 49 km da foz (02/março/2012 e 04/junho/2012), 54 km (08/setembro/2012) e 59 km (20/dezembro/2012) e a vazão defluente da UHE Coaracy Nunes (a 240 km da foz).

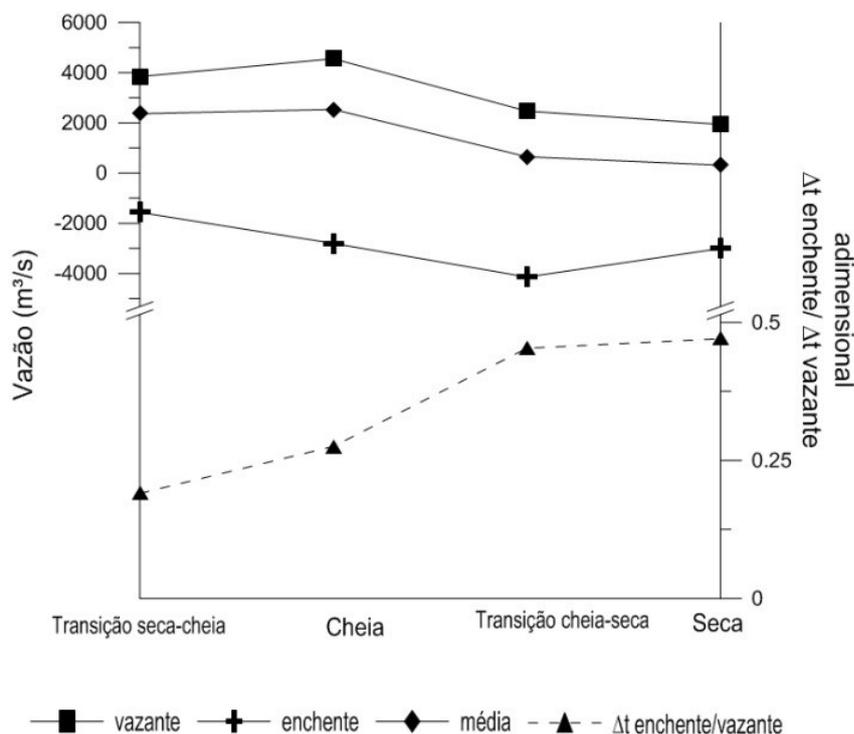


Figura 12: Comportamento sazonal das vazões médias e máximas de vazante e de enchente nas seções de medições e razão entre tempo de enchente e vazante.

As variações sazonais nas vazões na foz do Rio Araguari, durante o ano de 2011 podem ser claramente identificadas na figura 11a e 11b. As vazões do 1º semestre do ano, nos períodos de transição seca-cheia e de cheia, são significativamente maiores que no período de estiagem, correspondendo à transição cheia-seca e seca.

A figura 11b mostra o deslocamento no eixo temporal entre os pontos medidos em campo e a curva de vazão efluente da UHE. Os deslocamento entre as curvas dos gráficos foi de 7 dias para março/11, 27 dias para junho/11, 17 dias para setembro/11 e 8 dias para dezembro/11, comparando-se com o pico anterior mais próximo do dado medido em campo. Há também um diferença na vazão, onde a valor medido neste trabalho foi sempre maior que a vazão efluente da hidrelétrica devido às contribuições advindas da área remanescente da bacia hidrográfica a jusante da UHECN. Essas diferenças foram de ordem de 82 m³/s, 73 m³/s, 13 m³/s e 49 m³/s, respectivamente para as medições dos períodos de transição seca-cheia, cheia, transição cheia-seca e seca.

3.2. Batimetria

A figura 13 mostra o resultado do levantamento batimétrico. A resolução dos dados no trecho mais próximos à foz é menor pois, como já explanado anteriormente, não foi possível fazer medições nessa região.

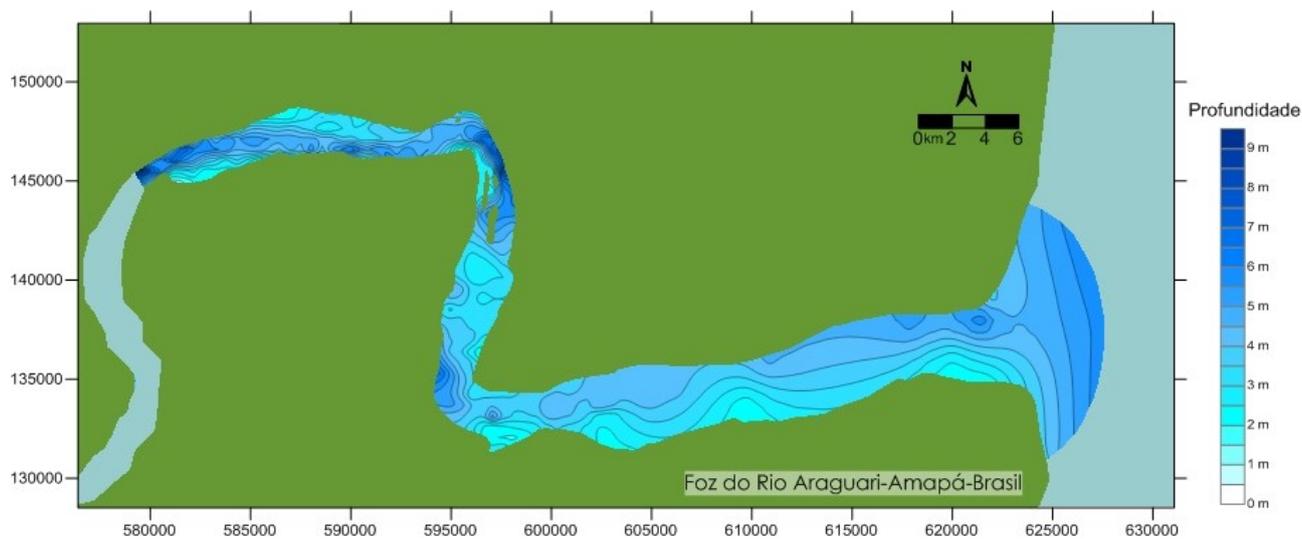


Figura 13: Batimetria com dados interpolados a partir de campo nos períodos transiçãoseca-cheia

Observe na figura 13 acima que a profundidade do Baixo Rio Araguari varia entre 0 e 9m, corroborando a consideração de se trata de águas rasas utilizado no sistema de modelagem SisBaHia.

3.3. Malha Numérica

A figura 14 mostra a malha gerada para este trabalho. Ela possui 507 elementos e 2264 nós. O domínio discretizado tem 207,43 km² e profundidade média de 6,59 m. O tamanho médio dos elementos é de 0,41 km². Considera-se para efeitos de modelagem que o fluxo laterais, das margens em direção ao rio, são nulos (condição de contorno). A fronteira oceano está sujeita às variações da elevação da superfície livre da água de acordo com a maré oceânica. Não foi imposta nenhuma vazão de entrada tanto na fronteira oceano quanto na fronteira rio, mas apenas as respectivas cotas.

O computador usado para as simulações tem um processador Intel Core i5, com 4GB de memória RAM, 2,27GHz e o tempo médio de processamento para o modelo hidrodinâmico foi de 4 minutos para 3 dias de simulação.

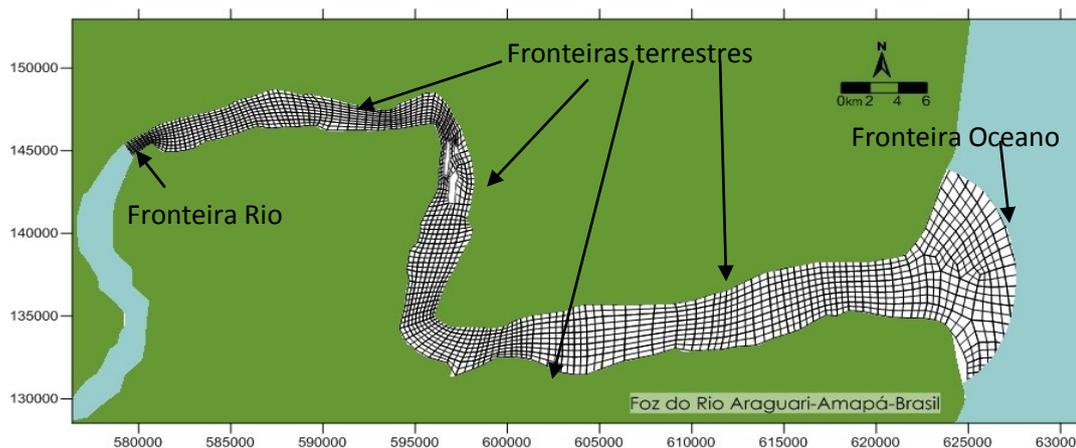


Figura 14: Foz do Rio Araguari – malha de elementos finitos

3.4. Parametrização dos Cenários Hidrodinâmicos

Das figuras 15 a 18 são apresentados os resultados da parametrização dos cenários modelados para a foz do Rio Araguari para diferentes comprimentos de intrusão de onda adotados na fronteira rio.

Para cada cenário, são comparados nas figuras, também, os dados medidos com a parametrização de melhor ajuste. As condições de fronteira oceânica são dependente das constantes harmônicas do marégrafo de Ponta Guará (no continente, margem direita do Rio Araguari, confluência com o Oceano Atlântico), datado para meia noite do dia anterior à data de cada medição de vazão. Este lapso temporal equivale a 30 horas anterior ao início das medidas de descarga líquida experimental. A mesma malha batimétrica foi utilizada para todas as simulações, representada pelas figuras 13 e 14 e parametrização com base nos dados da tabela 3.

Observe nas figuras 15, 16, 17 e 18, que as descargas líquidas simuladas são as únicas variáveis respostas de interesse na saída do modelo para esta análise.

Estas foram simuladas com base no tempo do ciclo da maré e sob influência do comprimento de intrusão da onda (L). Este procedimento foi realizado conforme a parametrização hidráulica discutida no tópico material e métodos, os quais incluem a geometria da malha computacional, cotas, harmônicas das marés, e demais parametrizações físicas como ângulo normal na fronteira-rio, condição inicial temporal, entre outros.

A figura 15a descreve todos os cenários de descarga líquida para o período seca-cheia (baixas precipitações de verão) realizados na seção 1 do domínio de controle. A figura 15b é idêntica à da figura 15a, com destaque para o melhor ajuste.

Na 1ª simulação, o melhor ajuste para este cenário ocorreu no cenário em que $L = 70$ km. Na presente simulação ocorreu apenas um razoável ajuste e aderência entre as duas curvas, com variações entre as amplitudes e o deslocamento temporal entre as máximas e mínimas vazões. A análise estatística dos erros e da correlação entre simulado e medido apontou $RMSE = 1,18$, $STD = 0,17$ e $r = 0,83$. Neste caso, o erro entre a descarga simulada e a experimental (figura 15b) pode ser classificada como de média dispersão.

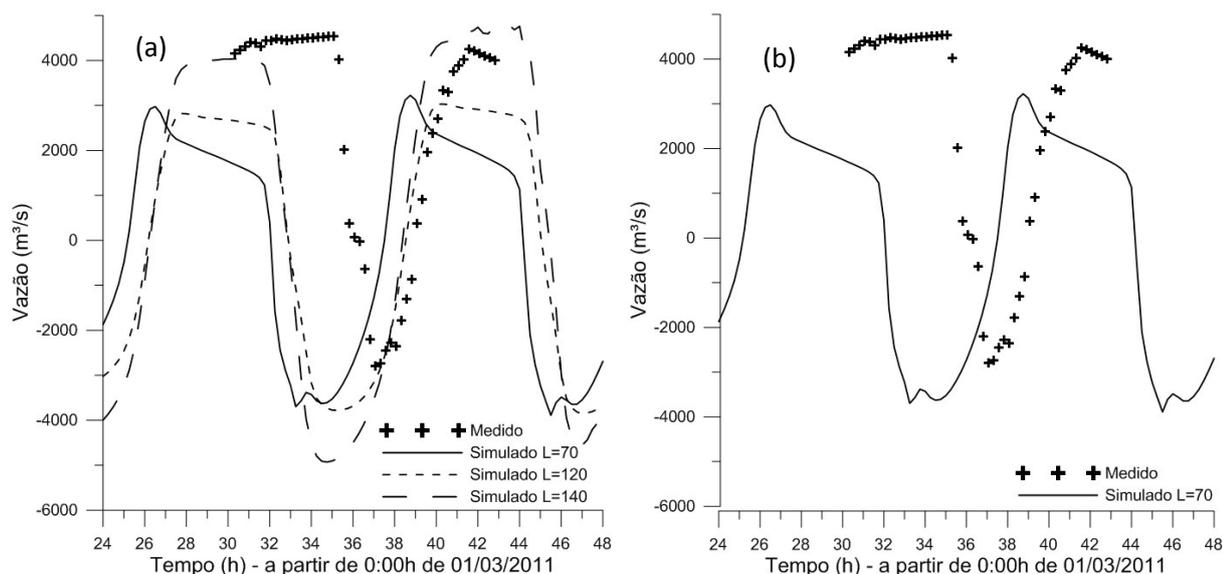


Figura 15: Comparação entre vazão medida e simulada na seção 1, no período de transição seca-cheia (março/11). (a) Parametrização do modelo variando-se o comprimento de intrusão da onda (L). (b) Mesmo cenário com melhor ajuste para $L = 70$ km

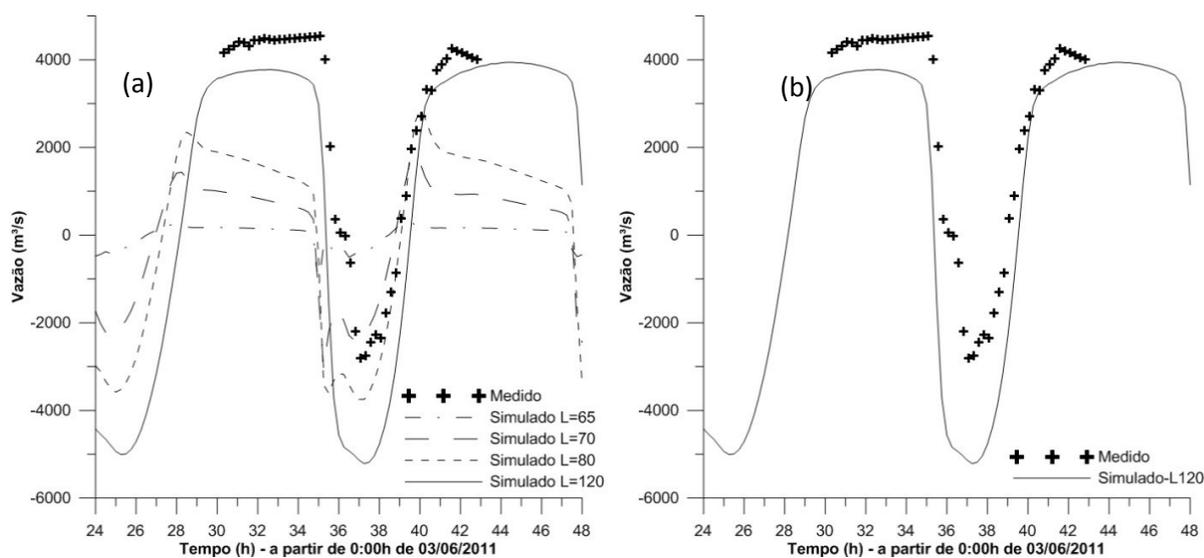


Figura 16: Comparação entre vazão medida e simulada na seção 1, no período de cheia (junho/11). (a) Parametrização do modelo variando-se o comprimento de intrusão da onda (L). (b) Mesmo cenário com melhor ajuste para $L = 120$ km

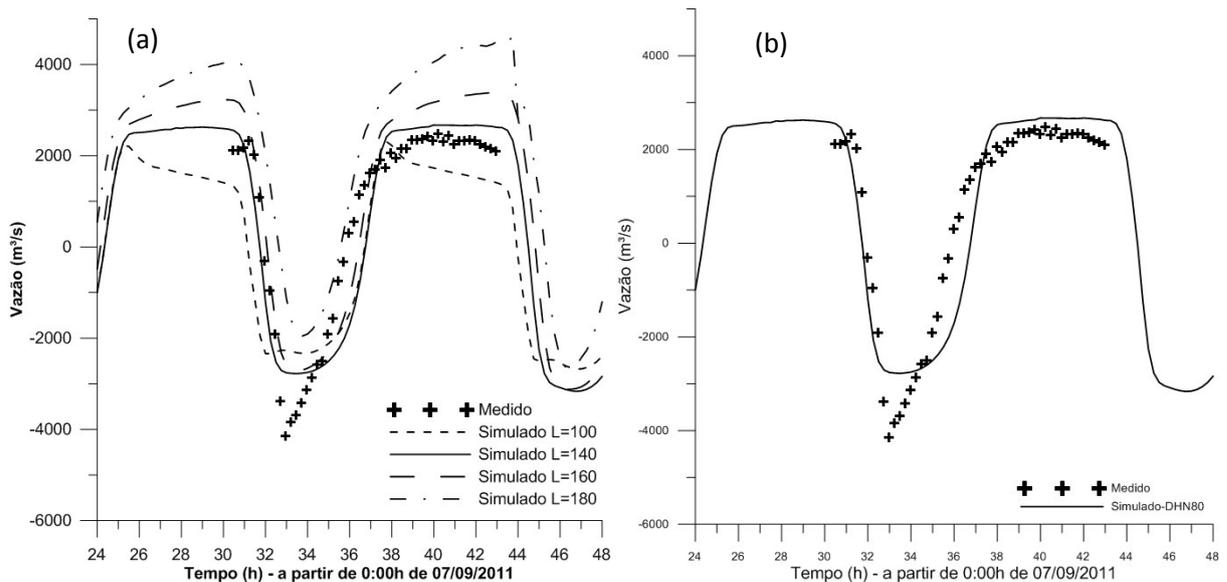


Figura 17: Comparação entre vazão medida e simulada na seção 1, no período transição cheia-seca (setembro/11). (a) Parametrização do modelo variando-se o comprimento de intrusão da onda (L). (b) Mesmo cenário com melhor ajuste para $L = 140$ km.

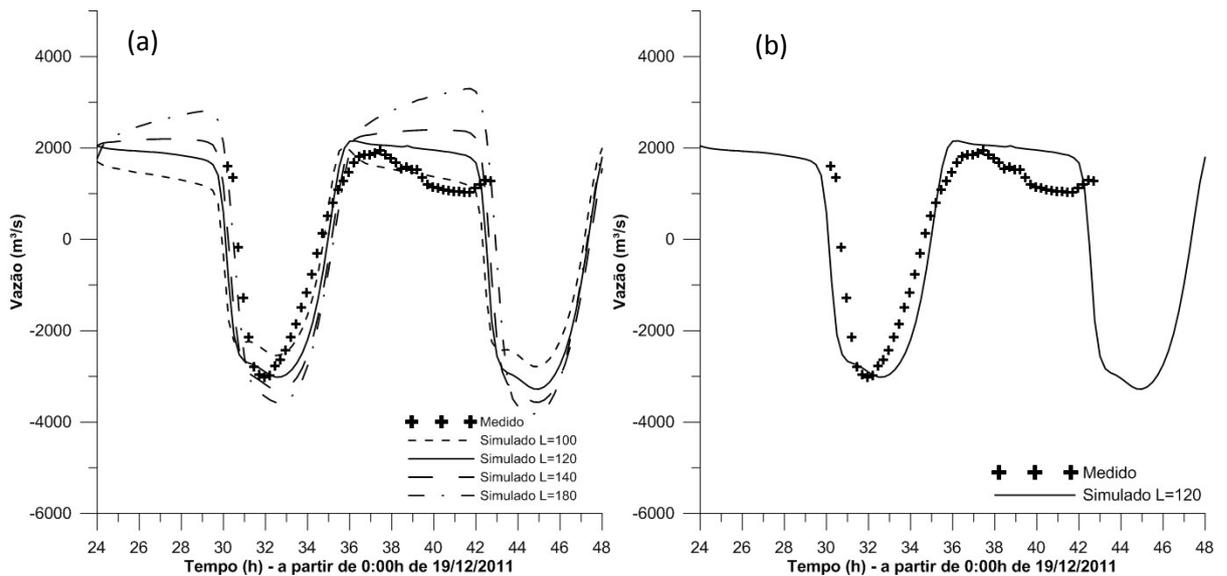


Figura 18: Comparação entre vazão medida e simulada na seção 1, no período seco (dezembro/11). (a) Parametrização do modelo variando-se o comprimento de intrusão da onda (L). (b) Mesmo cenário com melhor ajuste para $L = 120$ km

A figura 16a descreve todos os cenários de descarga líquida para o período cheia realizados na seção de controle (próximas das máximas precipitações na bacia). A figura 16b destaca a curva com melhor ajuste, ou seja, $L = 120$ km. Os parâmetros estatísticos indicaram baixa dispersão dos erros ($RSME = 0,78$ e $STD = 0,11$) e altíssima correlação entre dados experimentais e de simulados. Além disso, ocorreu um melhor ajuste visual entre ambas as curvas, sem deslocamento temporal do vale das curvas, encontrando-se bem ajustadas, mas com uma baixa subestimação dos valores simulados em relação aos experimentais.

A figura 17a descreve todos os cenários de descarga líquida para o período de transição cheia-seca realizados na seção de controle. A figura 17b apresenta a curva simulada para $L = 140$ km, que foi a parametrização com menor resultado para dispersão dos erros entre medido e simulado ($RMSE = 1,34$ e $STD = 0,19$). Porém, o coeficiente de correlação teve seu maior valor para $L = 180$ km ($r = 0,97$ contra $0,94$ para $L = 140$ km). Ocorreu um bom ajuste e aderência entre as duas curvas, com pequenas variações entre as amplitudes e quase sem deslocamento temporal entre as máximas e mínimas vazões. Há subestimação dos valores simulados em relação aos experimentais, principalmente para os maiores valores de maré vazante.

Por fim, a figura 18a descreve todos os cenários de descarga líquida para o período de seca realizados na seção de controle. A figura 18b destaca o melhor ajuste simulado para o cenário, que foi para $L = 120$ km. Visualmente, ocorreu o melhor ajuste entre as curvas experimentais e simuladas, mas foi justamente onde ocorreu o maior erro medido entre as duas diferentes curvas experimental e simuladas ($RMSE = 3,31$ e $STD = 0,46$). Mas assim como nos outros cenários simulados, o coeficiente de correlação foi elevado ($r = 0,88$ para $L = 120$ km e $r = 0,91$ para $L = 180$ km). Apesar desta média dispersão (a mais elevada entre as simulações) observou-se uma melhor aderência entre os dados quando se observam ambas as curvas, sem ocorrência de deslocamento temporal do vale das curvas. Neste caso, os erros estão mais associados à escala ou magnitude dos valores, elevando o valor destes indicadores.

Tabela 4: Comparação estatística entre os cenários e global.

Período	L (km)	RMSE	STD	r
Cenário 1 Mar/11 Seca-Cheia	70	<u>1,18</u>	<u>0,17</u>	<u>0,83</u>
	120	1,25	0,18	0,73
	140	1,39	0,20	0,77
Cenário 2 Jun/11 Cheia	65	1,39	0,19	0,47
	70	1,22	0,17	0,71
	80	1,08	0,15	0,82
	120	<u>0,78</u>	<u>0,11</u>	<u>0,97</u>
Cenário 3 Set/11 Cheia-Seca	100	1,95	0,27	0,88
	120	1,64	0,23	0,91
	140	<u>1,34</u>	<u>0,19</u>	0,94
	160	1,40	0,20	0,96
	180	2,84	0,40	<u>0,97</u>
Cenário 4 Dez/11 Seca	100	3,33	0,47	0,83
	120	<u>3,31</u>	<u>0,46</u>	0,88
	140	3,55	0,50	0,90
	180	4,42	0,62	<u>0,91</u>
Global	---	1,26	0,09	0,83

A tabela 4 apresenta resumo dos parâmetros estatísticos obtidos para os quatro cenários simulados. Para os dois primeiros cenários (transição seca-cheia e cheia, houve concordância entre as estatísticas de avaliação do erro entre simulados e medidos com o coeficiente de correlação. Entretanto, para os períodos menos chuvosos (intermediário cheia-seca e seca), o coeficiente de correlação é maior quando o comprimento de intrusão da onda parametrizado no modelo foi maior. Mas, vale destacar, que ainda assim, os valores de r foram elevados em qualquer desses cenários de Set/11 e Dez/11.

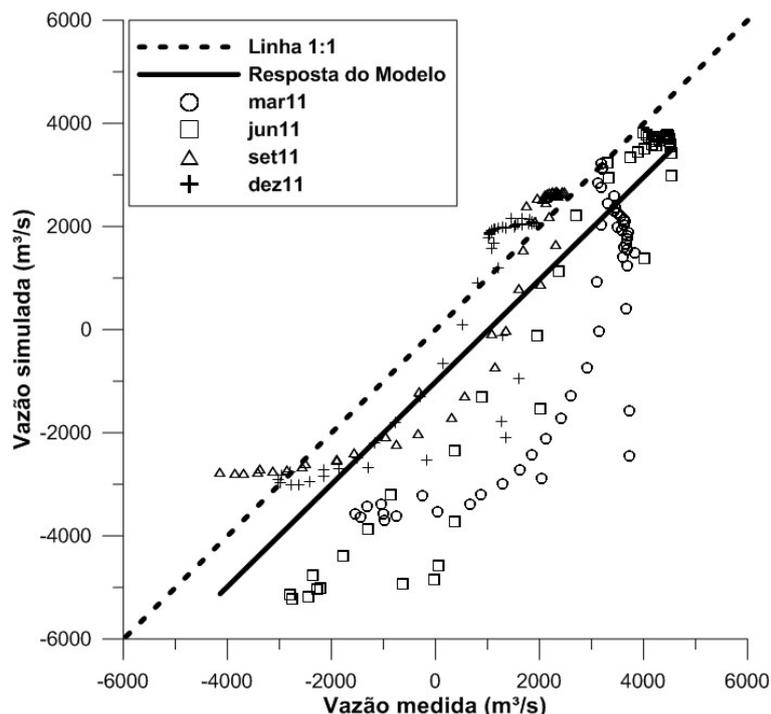


Figura 19: Comparação global entre os dados medidos e simulados para todos os cenários modelados. A linha 1:1 (pontilhada) representa o ajuste ideal, onde o modelo reproduziria exatamente os dados reais. O coeficiente de correlação entre vazão medida (x) e vazão simulada (y) foi de $r = 0,832$ e a equação da reta de melhor ajuste entre os eixos é $y = 0,993 * x - 1011$.

A figura 19 mostra representa o ajuste quando são considerados todos os valores de vazão medidos em comparação com os resultados simulados. Os parâmetros estatísticos para esses dados globais estão na tabela 4. Nessa figura 19, vê-se que a regressão linear que melhor se ajustou aos dados de todos os cenários está praticamente paralela a linha 1:1 (linha de ajuste ideal), com coeficiente angular igual a $m = 0,993$, mas abaixo da linha ideal, o que mostra que o modelo está subestimado, considerando todos os cenários em conjunto.

A figura 20 mostra o resultado da simulação do modelo para o cenário 2 (cheia – junho/2011) em 4 momentos referentes à seção 1 de medição de descarga líquida, durante um ciclo de maré. As imagens representam o comportamento dos vetores velocidade nos nós da malha discretizada e à elevação da coluna d'água no dia 04/06/2011, no seguintes horários: (a) 8:15h, (b) à 11:15h, (c) 13:30h e (d) 15:30h.

É importante salientar a diferença significativa que há entre cada período apresentado nesta figura, representando a característica dinâmica do escoamento em um sistema estuarino.

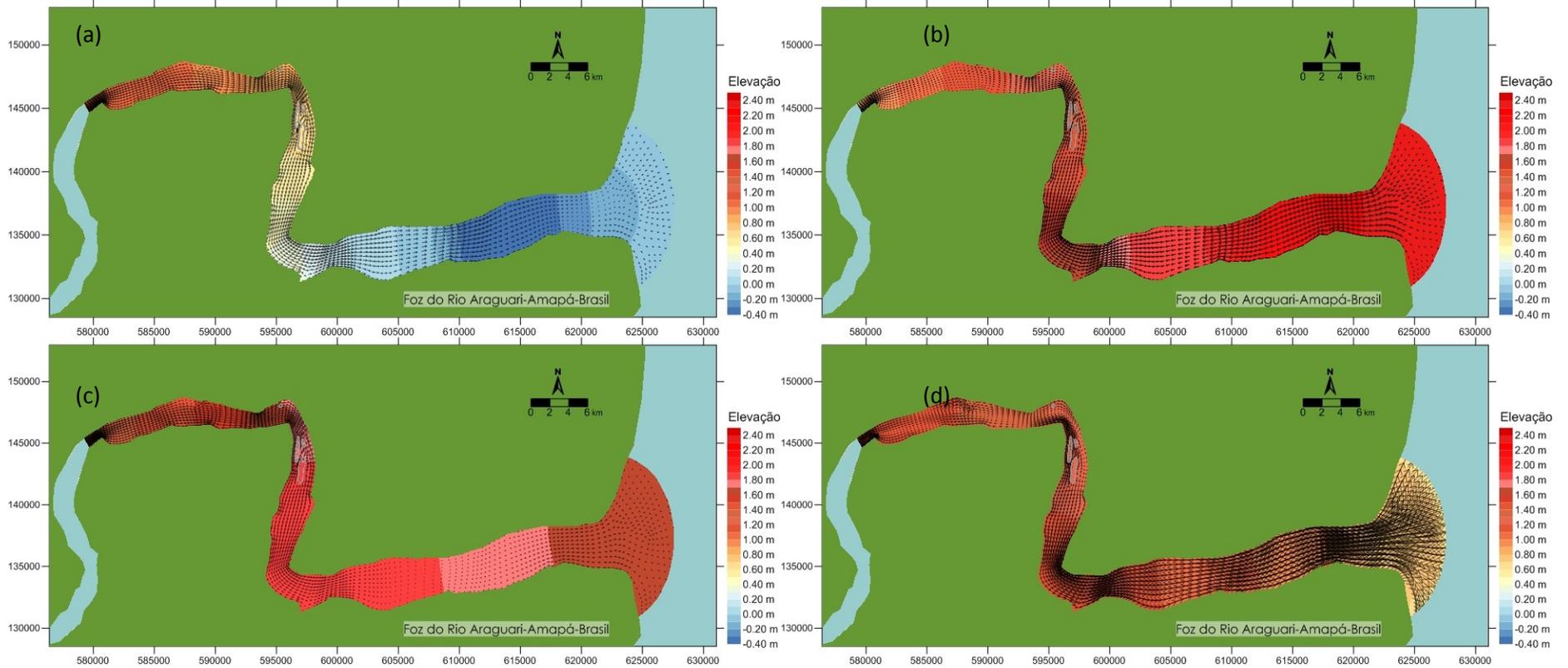


Figura 20: Isolinhas de elevação da superfície da água e campo de velocidades nodais no cenário 2 para (a) maior valor de vazão vazante medida, (b) virada de vazão vazante para enchete, (c) maior vazão enchete e (d) virada da vazão enchete para vazante, na seção 1 de medição de descarga líquida.

4. Discussão

Os resultados obtidos pelo sistema de modelagem SisBaHia adotado foram gerados a partir de características físicas no volume de controle modelado. Este volume de controle foi representado por todo o domínio da malha computacional indicado na figura 14.

Em cada volume de controle os dados de entrada foram a batimetria do fundo do canal principal de escoamento próximo da foz do rio, bem como a elevação da superfície da água na fronteira-oceano, as constantes harmônicas de marés semidiurnas, o ângulo de entrada e saída do fluxo na fronteira-rio, o nível de referência e o comprimento de intrusão da onda de remanso causado pela oscilação das marés.

O comprimento de intrusão da onda de remanso causado pela oscilação de marés foi denominado L , sendo um parâmetro imposto no processo de modelagem. Para cada cenário este procedimento foi aplicado de forma que se permitisse seu uso para obter a melhor calibração das curvas simuladas nos cenários sazonais hidrodinâmicos.

A obtenção da batimetria foi um aspecto importante no processo de modelagem de hidrodinâmica, por se tratar de uma etapa que define o campo de velocidade e as linhas de corrente preferenciais do escoamento controlado pela geometria de fundo. A batimetria também pode ter sido responsável fisicamente, pelo surgimento e desaparecimento de ondas locais.(Wilcox & Huertos, 2005; Merwade, 2009;Soto, 2004).

De acordo com os quatro cenários simulados da hidrodinâmica do Baixo Rio Araguari, verificou-se que este ecossistema aquático lótico, em ambiente estuarino, apresentou significativas variações espaço-sazonais devido às influências oceânicas e efeitos hidrológicos de montante na bacia (figura 11), os quais afetam os processos biogeoquímicos da água. Entre os mais relevantes o nível de oxigenação do corpo d'água (Cunha et al., 2011), taxas de renovação superficial (Bastos, 2010), intrusão salina(Ji et al., 2007;Gong & Shen, 2011), modificação da estrutura de fundo do canal (Wellmeyer et al., 2005), assoreamento e acreação das encostas (World Commission on Dams, 2000; Yang et al., 2003), biodegradação da matéria orgânica (Brito, 2008; Bárbara et al., 2010), cadeia alimentar(Poff et al., 2006), e até mesmo a mudança na estrutura de comunidades planctônicas, tanto no eixo espacial quanto no eixo sazonal (Domingues et al., 2007, 2011; Cunha, 2012).

Um efeito importante durante os fluxos e refluxos do escoamento é a elevação do nível d'água na fronteira-oceano, apesar deste ser um parâmetro sobre o qual não se tem um controle efetivo. Contudo, por intermédio das constantes harmônicas obtidas a partir de análise de

séries temporais da evolução da maré durante consideráveis períodos de monitoramento foi possível modelar suas variações ao longo de ciclos completos de marés. A importância das variações das cotas está relacionada não só com a direção preferencial do escoamento (direção e sentido), mas também com as trocas de nutrientes entre a água e o solo/margens (Yang et al., 2012).

Em períodos mais chuvosos (figura 16) as águas alcançam com mais facilidade as margens do canal de inundação e se propagam para dentro do continente reconectando o canal do rio principal com as lagoas laterais, carreando nutrientes e intensificando os processos de troca de espécies de algas, bactérias, protozoários, pequenos peixes, crustáceos, entre outros seres vivos terrestres e aquáticos da biodiversidade. Por outro lado, em períodos de transição (chuvoso para o seco, figura 17), as águas começam a baixar iniciando um processo de isolamento entre as margens do canal principal de inundação e as lagoas laterais. Esse processo de desconexão entre o rio principal com as lagoas laterais dá início aos processos de deposição de sedimentos, com modificação da hidrodinâmica lótica para uma mais lântica, mantendo o carreamento de nutrientes e diminuindo a intensidade dos processos de troca de espécies aquáticas (Yang et al., 2002).

No período seco, (figura 18), as águas sofrem processo de evaporação e começam se estabelecer em níveis muito baixos, interrompendo quase que totalmente os processos de troca de nutrientes entre as margens do canal principal de inundação e as lagoas laterais. Nesse processo de desconexão completa entre o rio principal com as lagoas laterais ocorre o início outros processos como o crescimento de plantas, que dão oportunidade para uma nova flora e fauna locais, como percebido no estuário do Rio Guadiana, Portugal (Domingues et al., 2005, 2007, 2011).

Todo este ciclo hidrológico global que ocorre na bacia hidrográfica (cheia, transição e seca) apresentam comportamentos perceptíveis ao longo de períodos trimestrais ou quadrimestrais, dependendo da climatologia regional (Cunha et al., 2010, 2012; Oliveira et al., 2010; Souza et al., 2010). Contudo, na presente investigação ocorreram as influências adicionais das marés semidiurnas, fazendo com que as amplitudes das cotas de inundações variem ao longo de períodos mais prolongados com fortes variações diárias. Portanto, as cotas, assim como as vazões e, portanto, a hidrodinâmica torna os ambientes estuarinos muito complexos, incorporando a variável flutuação da maré, remansos, e outras variações, as quais imprimem dinâmica nas variações sazonais. Neste aspecto, os sistemas são, em alguns períodos do dia e

em alguns períodos sazonais, ao mesmo tempo lóticos e lênticos, podendo tornar o ambiente muito difícil para a adaptação de algumas espécies terrestres ou aquáticas

Desta forma, com base nas figuras 15, 16, 17 e 18 (curvas das vazões experimentais e simuladas) percebe-se que os fatores sazonais das vazões podem e influenciam sobremaneira a dinâmica do escoamento e todas as suas conexões tróficas com a biodiversidade aquática.

É importante, portanto, entender as escalas de espaço e tempo que imprimem a ordem de grandeza dos fenômenos dinâmicos envolvidos, de sorte que as variáveis hidrodinâmica possam ser úteis para estimar seu potencial impacto na dinâmica dos processos de troca de nutrientes e sobre a cadeia trófica dos ecossistemas aquáticos nos ambientes estuarinos (algas e bactérias, por exemplo) (Martins et al., 2001; Lillebø et al., 2005; Azevedo et al., 2010).

Por outro lado, a elevação do nível d'água é uma característica específica para cada região, sendo dependente das fases da lua, sol, posição geográfica, horário, entre outras características físicas do estuário do Rio Araguari. Estas informações sobre a foz do Rio Araguari agora estão contidas nos cenários hidrodinâmicos simulados. Ressalte-se que esta abordagem também tem sido utilizada por outros autores na literatura da área de modelagem hidrodinâmica em sistemas estuarinos (Gabioux et al., 2005; Cunha, Ferreira, et al., 2006; Feitosa and Rosman, 2007; Bastos, 2010; Cunha et al., 2012). Portanto, somente é possível dispor de informações com base na parametrização física compatível com as escalas de tempo e espaço, para cumprir com os objetivos de cenários a partir do uso de dados maregráficos disponíveis. Neste aspecto, tanto as cotas quanto as vazões estão intrinsecamente correlacionadas.

Tanto que, ao se avaliar os resultados das vazões de modo geral, observou-se uma correlação global positiva entre as vazões simuladas e experimentais da ordem de 83%, mostrando que as simulações se aproximaram em um nível muito bom dos dados experimentais. Contudo, houve vieses de subestimação, quando se avaliou somente os dados com base em dados de cotas de nível d'água concomitantemente com as oscilações de marés simuladas com base nas harmônicas do marégrafo do Ponta Guará - AP, cujas séries de medidas estão interrompidas desde 1970. O desalinhamento temporal das medidas das constantes harmônicas e as análises simuladas atuais pode ter sido um dos principais fatores geradores de erros entre as vazões simuladas e as experimentais.

Por estas razões, a adoção de um nível de referência confiável é essencial para se obter uma boa malha batimétrica e, por consequência, bons resultados simulados ou mais próximos dos

medidos em campo (Siddique-E-Akbor et al., 2011; Rosman, 2012). A indisponibilidade de um equipamento mais preciso, como um DGPS, não permitiu adotar um nível de referência padrão ou comum ao adotado na estação maregráfica de Ponta Guará, o qual foi utilizado como a condição elevação zero ou de nível médio do mar. Entretanto, a solução encontrada e apresentada na seção Batimetria de Material e Métodos se mostrou adequada, dentro das suas limitações e erros esperados, gerando bons resultados simulados em nível aceitável para a presente análise em comparação aos confrontados com dados medidos em campo.

Considere-se que não foi imposto, nas condições iniciais e de contorno, nenhum valor referente à vazão, mas apenas dados referentes à geometria do volume de controle. Neste aspecto, observa-se que os resultados do balanço de massa e de forças, resultante do escoamento nas seções medidas puderam ser comparados com as saídas das vazões simuladas e, ao mesmo tempo, até comparadas com os resultados observados. Esta relação entre ambas foi significativa com forte correlação, da ordem de 83% (figura 19).

Os resultados das campanhas de medição de descarga líquida apresentados na figura 11 podem ser considerados como satisfatórios. Porque os valores de vazão defluente na saída da hidrelétrica de Coaracy Nunes são da mesma ordem de grandeza dos valores medidos, considerando-se que há defasagem temporal entre as medições (UHECN e vazões medidas neste trabalho) porque a hidrelétrica está localizada a 240 km da foz e a 180 km do início do domínio modelado. Deve-se levar em conta aqui que há um acréscimo da área de drenagem incremental (equivalente a 8.249 km², aproximadamente, 19% da área de toda a bacia) entre a UHE e as seções (figura 1). Esta análise não pode ser dissociada, contudo, de uma avaliação espacial do índice de precipitação no intervalo de tempo da ocorrência do fenômeno de escoamento no trecho em análise.

À primeira vista o tempo desse deslocamento parece estar muito elevado para o meses de junho (27 dias) e setembro (17 dias), o que significaria velocidades médias do fluxo da ordem de 0,10m/s. Entretanto, para se realizar análises mais aprofundadas a respeito desses resultados, são necessários refinamentos de dados meteorológicos e climatológicos deste trecho da bacia, o que foge do escopo deste estudo.

Diferenças de fase entre as descargas líquidas medidas e simuladas como no cenário 1 (figura 15) pode ser devido aos fatores físicos como alterações da geometria de fundo, uma vez que o levantamento batimétrico foi feito em março/12, um ano após a medição de descarga líquida deste cenário. Entre as 4 campanhas de medição de descarga líquida, essa é a de maior distância temporal realizada da campanha de levantamento batimétrico. E é o único dos

resultados em que ocorreu uma defasagem significativa entre os vales das curvas medida e simulada.

Nos cenários 2, 3 e 4, houve ajuste de fase entre as curvas de vazão medida e simulada, mas os resultados simulados apresentaram amplitude de vale hora menor (cenário 2 – cheia), hora maior (cenário 3 – transição cheia-seca). Fatores que contribuem para explicar essa diferença, além da batimetria de fundo, são a característica da rugosidade do leito adotada nas simulações (0,02 m) e o nível médio de referência adotado como dado de fronteira-oceano. Entretanto, apesar da deficiência dos dados, é possível afirmar que o modelo resultou em um bom ajuste, baixo nível de dispersão dos erros entre dados medidos e simulados.

Outro fato importante a se considerar os resultados deste trabalho é o parâmetro aqui nomeado de comprimento de intrusão da onda, L . A onda de maré oceânica que adentra no estuário é amortecida por fricção de fundo (representado pela variável ε – rugosidade), pelo atrito com as margens e ilhas no calha do rio e pelo próprio rio, que cria uma barreira hidráulica ao fluxo oceânico. Conforme a maré varia e o nível da superfície da água no oceano se eleva em relação ao nível do rio, as forçantes de montante fazem com que haja inversão do fluxo, ocorrendo uma vazão enchente, como observado em todos os cenários modelados e apresentados na figura 11.

Em todos os cenários modelados, o maior valor de L , como melhor ajuste estatístico, foi para $L = 180$ km (cenário 3). Este resultado é coerente com os dados da descarga líquida, uma vez que foi neste período que houve maior vazão enchente (-4141 m³/s) e com a segunda maior duração de enchente (3,9h) (figura 12). O significado físico deste resultado pode ser interpretado como sendo a distância que a onda gerada pela dinâmica estuária percorreria em direção à montante se o rio sofresse um decaimento da profundidade linearmente até um valor zero, com a inclinação dada pelo talude (figura 10).

Entretanto, a geometria do rio tem uma forma muito mais complexa que isso, com várias curvas no trecho entre a área de estudo e as barragens atuais e futuras. Além disso, pode atingir profundidades maiores do que do volume de controle da modelagem. Por essas características físicas, é de se esperar que a onda seja amortecida e atinja distâncias mesmo menores que os valores de L encontrados nas simulações realizadas.

Segundo World Commission on Dams (2000), barragens podem influenciar parâmetros de qualidade da água em distâncias variando de cerca de 2 km para oxigênio dissolvido (OD) até 100 km para o perfil de temperatura, por exemplo. Para barragens em série, quando não há

distância suficiente para recuperação de níveis naturais, a biologia de jusante pode ser afetada a muitas centenas de quilômetros. A construção de barragem para geração de energia hidrelétrica a apenas 21,6 km do estuário do Rio Douro, Portugal causou alterações na carga de nutrientes nesse estuário. Mudanças hidrodinâmicas e morfológicas de fundo foram percebidas no estuário do Rio Keum, Coréia do Sul, causadas pela construção de barragem a 8 km da foz (Kim et al., 2006). No estuário do Rio Danshuei, Taiwan, a construção da barragem de Shinmen, localizada a 60 km da foz, provocou alterações de 2-3 km na intrusão salina e redução no tempo de enchente no estuário (Liu, 2007). Em todos esses estudos, houve impactos sentidos nos estuários dos rios estudados devido existência de barragens a montante. Porém, as distâncias em que as barragens foram construídas são bem menores do que ocorre no Rio Araguari, onde a barragem mais próxima estará a mais de 200 km da foz.

Entretanto, como já mencionado na introdução deste trabalho, os efeitos que barragens causam em estuário vão além de impactos na hidrodinâmica da região estuarina, mas podendo afetar o transporte de sedimentos, sucessões ecológicas, dinâmicas de populações.

Por isso, a conclusão deste trabalho de que, no Rio Araguari, os fatores de jusante (como efeitos de maré) têm maior impacto na hidrodinâmica da foz do que fatores antrópicos de montante, como a construção de barragens, não devem excluir maiores investigações no sentido de avaliar impactos de segunda ordem (produtores primários, flora) e de terceira ordem (fauna), conforme classificação da World Commission on Dams, (2000).

5. Aplicações do Modelo

5.1 Análise de Cenário - Integração Hidrodinâmica x Taxa de Renovação Superficial

De acordo com Lung (1993) os modelos estuarinos podem ser classificados dentro de dois grupos: modelos hidrodinâmicos e modelos de qualidade da água. Estes modelos são designados para calcular a concentração ou distribuição de um constituinte, propriedade ou parâmetro no estuário. O mesmo autor afirma ainda que, para determinar as concentrações ou distribuições, processos de transportes e processos de transformação devem ser resolvidos. Os processos de transporte são basicamente hidrodinâmica e inclui a advecção, difusão turbulenta e, se a redução espacial é resolvida, dispersão. Por outro lado, os processos de transformação englobam as fontes e sumidouros para os quais os parâmetros é sujeito e pode ser físico, químico ou biológico.

A seguir é apresentado um exemplo do uso da hidrodinâmica acoplada às características de autodepuração das águas. Os objetivos são tentar descrever a lógica da dinâmica das taxas de renovação das águas a partir das mudanças espaço sazonal do comportamento da hidrodinâmica disponível do escoamento na foz do rio.

A figura 21 mostra visualmente um resultado elaborado dos campos de concentração das águas novas entrando no domínio computacional, com uso do software SisBaHia. O período de seca foi escolhido convenientemente para ilustrar como as águas de montante e do Oceano Atlântico influenciam as águas contidas no domínio computacional (trecho de rio analisado).

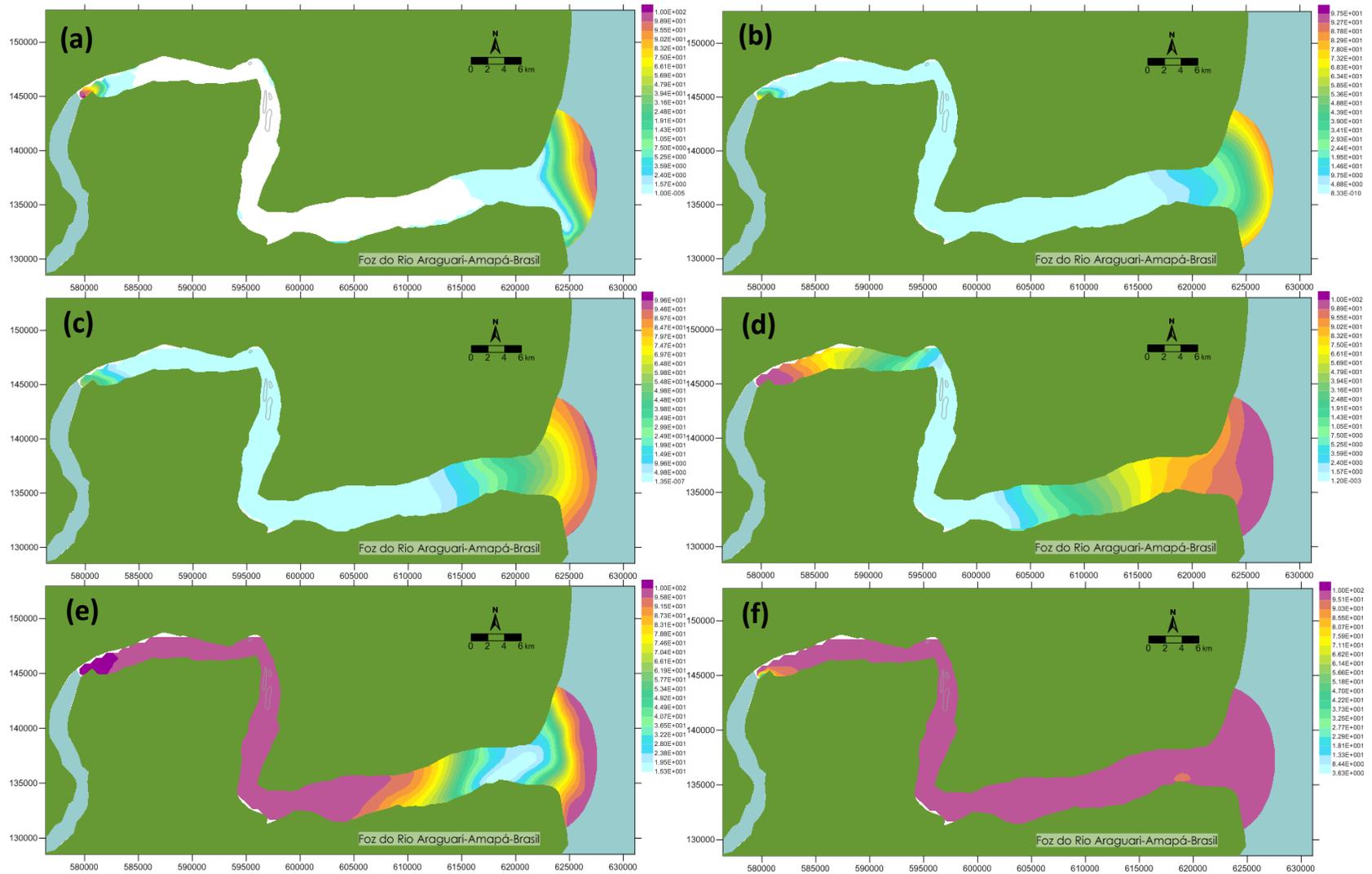


Figura 21: Taxa de renovação no estuário do Rio Araguari simulado para o período seco em intervalos de tempo diferentes a partir de 0:00h do dia 19/12/2012: (a) 3h; (b) 1 dia; (c) 2 dias; (d) 5 dias; (e) 10 dias e (f) 15 dias.

O tempo de residência da água significa o tempo médio que uma parcela da água leva para se renovar em um corpo hídrico, como estuário, por exemplo (Kenov et al., 2012). Seu conhecimento é importante para avaliar a dimensão de impactos de poluentes na água porque determina o tempo que o ecossistema analisado passa pelo estresse provocado pela poluição, qualquer que seja esta poluição (considerando o poluente como conservativo no tempo de análise).

Portanto, a taxa de renovação é o inverso do tempo de residência, ou seja, quanto maior o tempo de residência, menor a taxa de renovação e vice-versa.

Como informado anteriormente, uma aplicação importante do modelo hidrodinâmico é determinar a taxa de renovação no estuário do Rio Araguari. A figura 21 apresenta o resultado da simulação da taxa de renovação para o período seco (dezembro/2011), usando o modelo de transporte euleriano (Rosman, 2012). Considerando que “água nova” encontra-se na fronteira do domínio modelado, com valor de 100% e que a “água “antiga” é a água inicialmente dentro do domínio modelado, procede-se a simulação. Para este período, o tempo necessário para a renovação do trecho foi de, aproximadamente, 15 dias.

Este resultado é um demonstrativo do potencial da ferramenta empregada pelo SisBaHia. Porém, esta análise não foi aprofundado por conveniência e porque fugiria do escopo do objetivo da dissertação de mestrado. Assim, a intenção desta ilustração é apenas demonstrar uma aplicação objetiva e estratégica de como o modelo pode ser utilizado em trabalhos atuais e futuros, dependendo do problema de pesquisa mencionado.

5. 2. Análise de Cenário - Integração Hidrodinâmica x Qualidade da Água

O SisBaHia possibilita simular o transporte de escalares (não conservativos - como a DBO e OD) que se encontram dissolvidas na coluna d'água. Esse Modelo de Qualidade da Água utiliza um modelo de transporte Euleriano advectivo-difusivo com reações cinéticas e considera os ciclos de oxigênio, nitrogênio e fósforo (Cunha, Rosman, et al., 2006). O oxigênio é importante no processo de oxidação da matéria orgânica. As fontes de oxigênio são a reatuação através da atmosfera, produção através da fotossíntese e oxigênio dissolvido na água que entra no volume modelado. Entre os sumidouros se incluem a oxidação de carbonáceos e de nitrogênio, a demanda de oxigênio nos sedimentos do corpo d'água e o uso para respiração das plantas (Cunha, Rosman, et al., 2006; Fragoso-Jr et al., 2009)

A figura 22 apresenta o resultado de uma simulação da qualidade da água para o mês de março/11 (período de transição seca-cheia) para o parâmetro oxigênio dissolvido. Foram impostas como condições de contorno, o valor de 8 mg/L no oceano e 6 mg/L na fronteira rio.

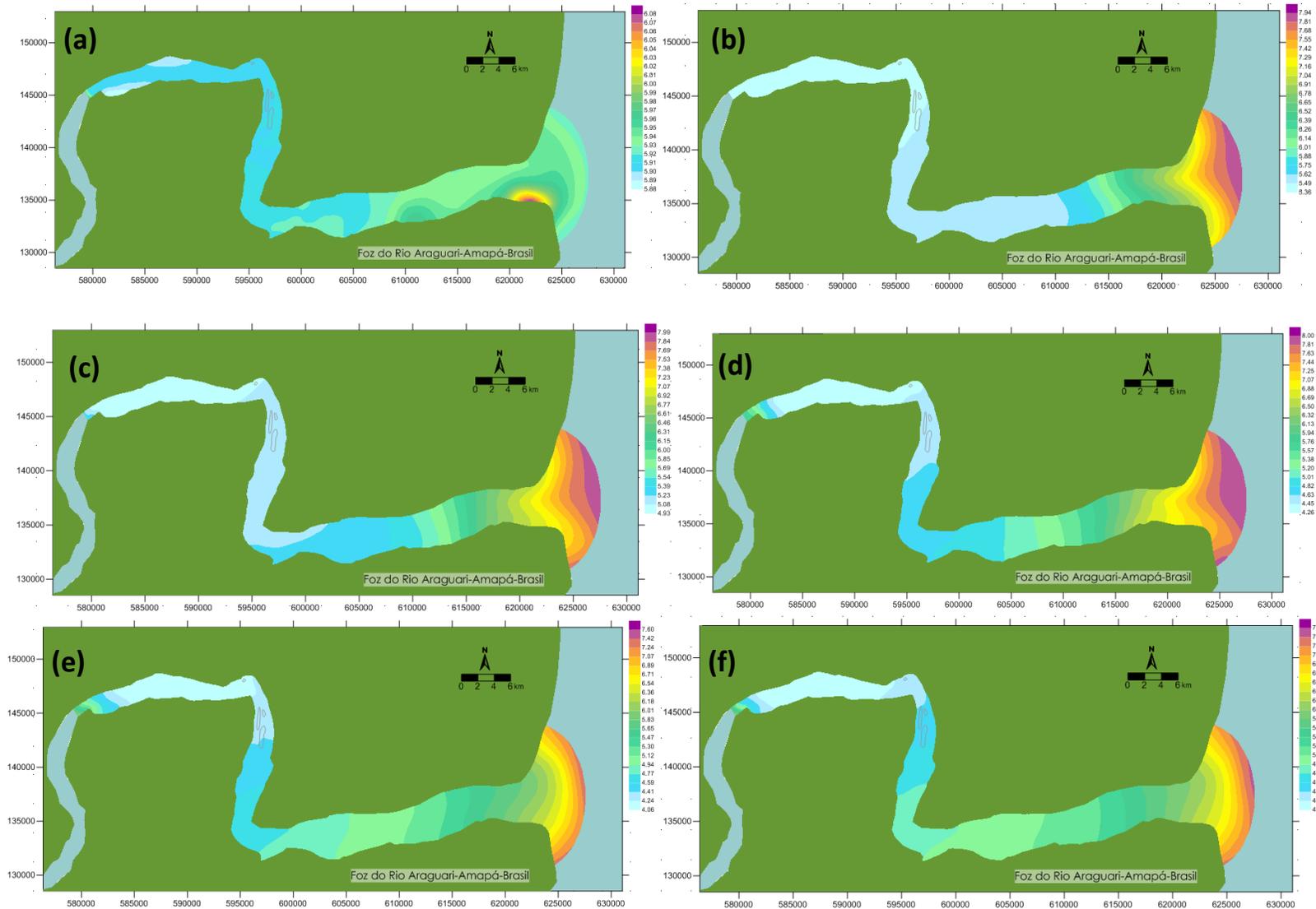


Figura 22: Exemplo do campo de oxigênio dissolvido da área de estudo, resultado de simulação no período de março de 2011, em intervalos de tempos contados a partir de 0:00h de 01/03/2012: (a) 3h; (b) 1 dia; (c) 2 dias; (d) 5 dias; (e) 10 dias e (f) 15 dias.

Assim, tal como apresentado acima, esta simulação serve apenas para o propósito demonstrativo da capacidade e da importância da modelagem hidrodinâmica acoplada aos da qualidade da água para previsão de cenários, análises ecológicas ou outras aplicações na qual a hidrodinâmica é o principal componente que governa toda a dinâmica transiente dos ecossistemas aquáticos. Assim é de interesse de estudiosos e cientistas que precisem desse conhecimento para entender o papel básico da hidrodinâmica e como esta interage com a qualidade da água.

6. Conclusão

Neste trabalho realizou-se a parametrização de modelo hidrodinâmico em 60 km da foz do Rio Araguari, utilizando o software SisBaHiA®.

O principal parâmetro do modelo usado para calibração foi o comprimento de intrusão da onda (L) a partir da fronteira rio. L é um parâmetro hidráulico usado como condição de contorno do SisBaHiA® que indica a distância além do domínio da modelagem que a onda avança em direção à montante.

Avaliou-se estatisticamente a resposta do modelo em relação às medições de descarga líquida experimentais realizadas em períodos trimestrais no ano de 2011. As estatísticas usadas para a comparação foram o desvio padrão geral (STD) e da raiz quadrada do erro médio (RMSE) para medidas dos erros entre os resultados medidos e os simulados, e o coeficiente de correlação (r) para avaliar se houve relação entre dados medidos e resultados simulados.

Os períodos sazonais medidos foram o de transição seca-cheia (cenário 1 – março/2011), cheia (cenário 2 – junho/2011), transição cheia-seca (cenário 3 – setembro/2011) e seca (cenário 4 – dezembro/2011). O parâmetro variado em todos os cenários foi o comprimento de intrusão de onda (L), que representa a distância que o remanso da onda de maré avança para montante. Os valores de L (medidos a partir da foz) que melhor se ajustaram foi de 70 km, para o cenário 1, 120 km para os cenários 2 e 4, e de 140-180 km para o cenário 3. O STD para o melhor ajuste de cada simulação foi de 17%, 11%, 19% e 46%, e o RMSE de 1,25, 0,78, 1,34 e 3,31, respectivamente para os cenários de 1 a 4. Nos quatro cenários, o coeficiente de correlação nas parametrizações de melhor ajuste foram elevados, variando de 83 a 97%.

A análise dos dados globais de todos os cenários estudados mostrou que o modelo hidrodinâmico desenvolvido neste trabalho tem um ajuste bastante satisfatório aos dados medidos, com coeficiente de correção global igual a 83%, e desvio padrão dos erros igual a 9%, apesar de resultados simulados subestimarem os valores de campo.

O modelo pode ser melhorado através de aquisição de dados batimétricos com adensamento das linhas de medição, utilização de DGPS para se obter um referencial de nível confiável e acoplamento de dados meteorológicos como vento e precipitação para reproduzir com maior precisão a hidrodinâmica da foz do Rio Araguari.

Os resultados deste trabalho mostram, também, que barreiras físicas no Rio Araguari, como a construção de barragens, em distâncias superiores a 180 km da foz não causam perturbações perceptíveis na onda de maré se propagando até a foz do rio. Essa informação mostra que a hidrodinâmica na região estuarina, para uma mesma geometria de fundo, é menos influenciada pelas variações hidrológicas sazonais ou antrópicas da bacia do que pelos efeitos diários da maré oceânica (condição de contorno de jusante).

Os efeitos da construção de barragens a 224 km a montante da foz do Rio Araguari tendem a não se propagar além do seu impacto real até a uns 140 km, no máximo. Mas estas conclusões não são válidas para as outras alterações que possam ser provocadas ao longo do trecho pela construção de barragens, tais como a retenção da carga de sedimentos, modificação de parâmetros físico-químicos e efeitos antrópicos relacionados ao uso e ocupação do solo.

Do ponto de vista da hidrodinâmica, a importância desses resultados para a gestão dos recursos hídricos, como a implantação dos instrumentos da política estadual de recursos hídricos, podem ser aplicadas aos sistemas de outorga, enquadramento do corpo d'água, plano estadual de recursos hídricos e ferramenta de estudo e análise junto ao comitê diretor estadual para a bacia hidrográfica, bem como aos comitês gestores da REBIO do Lago Piratuba e outras unidades de conservação presentes na bacia. Neste caso, são necessários mais estudos nessas áreas para se compreender o comportamento da hidrodinâmica sobre os ecossistemas aquáticos.

Referências Bibliográficas

- ANA, 2012. Agência Nacional de Águas [WWW Document]. Hidroweb. URL <http://hidroweb.ana.gov.br/>
- Aardoom, J.H., 2006. Quantification of sediment concentrations and fluxes from ADCP measurements. IXèmes Journées Brest 501-510.
- Abbot, M.B., Basco, D.R., 1989. Computational Fluid Dynamics: an Introduction for Engineers, 1^o ed. Longman Scientific & Technical.
- Azevedo, I.C., Bordalo, A. a, Duarte, P.M., 2010. Influence of river discharge patterns on the hydrodynamics and potential contaminant dispersion in the Douro estuary (Portugal). Water research 44, 3133-46.
- Banda, M.K., Seaid, M., 2012. Lattice Boltzmann Simulation for Shallow Water Flow Applications. In: Zheng, J. (Ed.), Hydrodynamics – Theory and Model. InTech, Rijeka, p. 306.
- Bastos, A.M., 2010. Modelagem de Escoamento Ambiental como Subsídio à Gestão de Ecossistemas Aquáticos no Baixo Igarapé da Fortaleza - AP.
- Brito, D.C., 2008. Aplicação do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2Kw em Grandes Rios: O Caso do Alto e Médio Araguari – AP.
- Brush, M.J., Harris, L. a., 2010. Introduction to the special issue of Ecological Modelling: “Advances in Modeling Estuarine and Coastal Ecosystems: Approaches, Validation, and Applications”. Ecological Modelling 221, 965-968.
- Bárbara, V.F., 2006. Uso do Modelo QUAL2E no estudo da qualidade da água e da capacidade de autodepuração do Rio Araguari-AP (Amazônia).
- Bárbara, V.F., Cunha, A.C., Rodrigues, A.S. de L., Siqueira, E.Q. de, 2010. Monitoramento sazonal da qualidade da água do rio Araguari / AP. Revista Biociências 16, 57-72.
- Chung, E.G., Bombardelli, F. a., Schladow, S.G., 2009. Modeling linkages between sediment resuspension and water quality in a shallow, eutrophic, wind-exposed lake. Ecological Modelling 220, 1251-1265.
- Costanza, R., Arge, R., Groot, R.D., Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Neill, R.V.O., Paruelo, J., Raskin, R.G., Suttonkk, P., 1997. The value of the world ' s ecosystem services and natural capital. Nature 387, 253-260.
- Cunha, A.C., 2004. Determinação do coeficiente de reaeração no Modelo QUAL2E utilizando as características hidráulicas de canais abertos para Estudos de Impactos Ambientais no Rio Araguari-AP. Macapá.
- Cunha, A.C., Brito, D.C., Cunha, H.F.A., Schulz, H.E., 2011. Dam Effect on Stream Reaeration Evaluated with QUAL2KW Model: Case Study of the Araguari River,

- Amazon Region, Amapá State/Brazil. In: Bilibio, C., Hensel, O., Selbach, J. (Eds.), *Sustainable Water Management in the Tropics and Subtropics – And Case Studies in Brazil*. Fundação Universidade Federal do Pampa, Jaguarão/RS, p. 697.
- Cunha, A.C., Brito, D.C., Junior, A.C.B., Pinheiro, L.A. dos R., Cunha, H.F.A., Santos, E.S. dos, Krusche, A.V., 2012. Challenges and Solutions for Hydrodynamic and Water Quality in Rivers in the Amazon Basin. In: Schulz, H.E., Simões, A.L.A., Lobosco, R.J. (Eds.), *Hydrodynamics - Natural Water Bodies*. InTech, Rijeka/Croácia, pp. 67-88.
- Cunha, A.C., Souza, E.B. de, Cunha, H.F.A., 2010. Tempo, Clima e Recursos Hídricos - Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá, 1ª ed. IEPA, Macapá/AP.
- Cunha, C.L.N., Ferreira, A.P., Rosman, P.C.C., 2006. Contribuições para o Desenvolvimento da Capacidade de Previsão de um Modelo de Qualidade de Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 11, 71-83.
- Cunha, C.L.N., Rosman, P.C.C., 2005. A semi-implicit finite element model for natural water bodies. *Water research* 39, 2034-2047.
- Cunha, C.L.N., Rosman, P.C.C., Ferreira, A.P., Monteiro, T.C. do N., 2006. Hydrodynamics and water quality models applied to Sepetiba Bay. *Continental Shelf Research* 26, 1940-1953.
- Cunha, E.D.S., 2012. Levantamento Florístico, Dinâmica Espaço-Temporal e Quantificação da Biomassa do Fitoplâncton dos Rios Araguari e Falsino (Amapá-Brasil).
- Dinehart, R.L., Burau, J.R., 2005. Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river. *Journal of Hydrology* 314, 1-21.
- Domingues, R.B., Anselmo, T.P., Barbosa, A.B., Sommer, U., Galvão, H.M., 2011. Nutrient limitation of phytoplankton growth in the freshwater tidal zone of a turbid, Mediterranean estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 91, 282-297.
- Domingues, R.B., Barbosa, A., Galvão, H., 2005. Nutrients, light and phytoplankton succession in a temperate estuary (the Guadiana, south-western Iberia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64, 249-260.
- Domingues, R.B., Sobrino, C., Galvão, H., 2007. Impact of reservoir filling on phytoplankton succession and cyanobacteria blooms in a temperate estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74, 31-43.
- Ecotumucumaque, 2010. Estudo de Impacto Ambiental da UHE Ferreira Gomes- Meio Físico. Macapá/AP.
- Ecotumucumaque, 2011. Estudo de Impacto Ambiental da UHE Cachoeira Caldeirão - Meio Físico. Macapá/AP.
- Eletronorte, 1999. Estudos De Inventário Hidrelétrico – Bacia Hidrográfica do Rio Araguari – Estado do Amapá – Relatório Final.

- Eletronorte, 2011. Vazões Efluentes da UHE Coaracy Nunes.
- Eletronorte, 2012. Geração de Energia no Amapá [WWW Document]. URL <http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados/amapa/>
- Van Emden, H., 2008. *Statistics for Terrified Biologists*, 1^o ed. Blackwell Publishing Ltd.
- FEMAR, 2012. Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras: Estação Ponta Guará [WWW Document]. URL <http://www.fundacaoofemar.org.br/biblioteca/emb/tabelas/009.html>
- Feitosa, R.C., Rosman, P.C.C., 2007. Emissários Submarinos de Esgoto: Aspectos de Qualidade de Água e Modelagem Computacional. In: Silva, R.C.V. (Ed.), *Métodos Numéricos Em Recursos Hídricos - Volume 8*. ABRH, pp. 1-209.
- Fragoso-Jr, C.R., Ferreira, T.F., Marques, D.M.L.M., 2009. *Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos*, 1^a ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- Gabioux, M., Vinzon, S.B., Paiva, A.M., 2005. Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf. *Continental Shelf Research* 25, 113-125.
- Gallo, M.N., Vinzon, S.B., 2005. Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dynamics* 55, 441-448.
- Gleizon, P., Punt, a, Lyons, M., 2003. Modelling hydrodynamics and sediment flux within a macrotidal estuary: problems and solutions. *The Science of The Total Environment* 314-316, 589-597.
- Gong, W., Shen, J., 2011. The response of salt intrusion to changes in river discharge and tidal mixing during the dry season in the Modaomen Estuary, China. *Continental Shelf Research* 31, 769-788.
- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228, 113-129.
- Ji, Z.-G., Hu, G., Shen, J., Wan, Y., 2007. Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in the St. Lucie Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73, 188-200.
- Jiao, N., Zhang, Y., Zeng, Y., Gardner, W.D., Mishonov, A.V., Richardson, M.J., Hong, N., Pan, D., Yan, X.-H., Jo, Y.-H., Chen, C.-T.A., Wang, P., Chen, Y., Hong, H., Bai, Y., Chen, X., Huang, B., Deng, H., Shi, Y., Yang, D., 2007. Ecological anomalies in the East China Sea: impacts of the Three Gorges Dam? *Water research* 41, 1287-93.
- Kenov, I.A., Garcia, A.C., Neves, R., 2012. Residence time of water in the Mondego Estuary (Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 106, 13-22.
- Kim, T.I., Choi, B.H., Lee, S.W., 2006. Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments in the Keum River Estuary, Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68, 515-528.

- Kingsford, R.T., 2000. Ecological impacts of dams , water diversions and river management on floodplain wetlands in Australia. *Austral Ecology* 25, 109-127.
- Lillebø, a. I., Neto, J.M., Martins, I., Verdelhos, T., Leston, S., Cardoso, P.G., Ferreira, S.M., Marques, J.C., Pardal, M. a., 2005. Management of a shallow temperate estuary to control eutrophication: The effect of hydrodynamics on the system's nutrient loading. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 65, 697-707.
- Lindim, C., Pinho, J.L., Vieira, J.M.P., 2011. Analysis of spatial and temporal patterns in a large reservoir using water quality and hydrodynamic modeling. *Ecological Modelling* 222, 2485-2494.
- Liu, W.-C., 2007. Modelling the effects of reservoir construction on tidal hydrodynamics and suspended sediment distribution in Danshuei River estuary. *Environmental Modelling & Software* 22, 1588-1600.
- Liu, Y., Guo, H., Yu, Y., Dai, Y., Zhou, F., 2008. Ecological–economic modeling as a tool for watershed management: A case study of Lake Qionghai watershed, China. *Limnologia - Ecology and Management of Inland Waters* 38, 89-104.
- Lung, W.-S., 1993. *Water Quality Modeling - Volume III: Application to Estuaries*, 1st ed. CRC Press, Florida.
- Martins, I., Pardal, M.Â., Lillebø, a. I., Flindt, M.R., Marques, J.C., 2001. Hydrodynamics as a Major Factor Controlling the Occurrence of Green Macroalgal Blooms in a Eutrophic Estuary: A Case Study on the Influence of Precipitation and River Management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 52, 165-177.
- Matos, M. de F.A. de, 2009. Caracterização de processos morfodinâmicos e hidrodinâmicos do cinturão lacustre meridional da Reserva Biológica do Lago Piratuba, Amapá.
- Merwade, V., 2009. Effect of spatial trends on interpolation of river bathymetry. *Journal of Hydrology* 371, 169-181.
- Mueller, D.S., Wagner, C.R., 2009. Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. In: *U.S. Geological Survey Techniques and Methods* 3A-22. Virginia, p. 72.
- Muste, M., Yu, K., Spasojevic, M., 2004. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation* 15, 1-16.
- Oliveira, L.L., Cunha, A.C., Jesus, E.S., Barreto, N.J.C., 2010. Características Hidroclimáticas da Bacia do Rio Araguari. In: Cunha, A.C., Souza, E.B., Cunha, H.F.A. (Eds.), *Tempo, Clima e Recursos Hídricos - Resultados Do Projeto REMETAP No Estado Do Amapá*. IEPA, p. 216.
- PROVAM, 1990. Programa de Estudos e Pesquisas nos Vales Amazônicos. Belém/PA.

- Phillips, J.D., Slattery, M.C., Musselman, Z. a., 2004. Dam-to-delta sediment inputs and storage in the lower trinity river, Texas. *Geomorphology* 62, 17-34.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C., 1997. The Natural Flow Regime. *Bioscience* 47, 769-784.
- Poff, N.L., Bledsoe, B.P., Cuhaciyan, C.O., 2006. Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems. *Geomorphology* 79, 264-285.
- Rajar, R., Cetina, M., 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: An experience. *Ecological Modelling* 101, 195-207.
- Rajar, R., Cetina, M., Sirca, A., 1997. Hydrodynamic and water quality modelling: case studies. *Ecological Modelling* 101, 209-228.
- Rosman, P.C.C., 2001. Um sistema computacional de hidrodinâmica ambiental. In: Silva, R.C.V. (Ed.), *Métodos Numéricos Em Recursos Hídricos - Volume 5*. ABRH, pp. 1-161.
- Rosman, P.C.C., 2012. Referência Técnica do SisBaHiA.
- Shen, C., Niu, J., Anderson, E.J., Phanikumar, M.S., 2010. Estimating longitudinal dispersion in rivers using Acoustic Doppler Current Profilers. *Advances in Water Resources* 33, 615-623.
- Siddique-E-Akbor, A.H.M., Hossain, F., Lee, H., Shum, C.K., 2011. Inter-comparison study of water level estimates derived from hydrodynamic–hydrologic model and satellite altimetry for a complex deltaic environment. *Remote Sensing of Environment* 115, 1522-1531.
- Sklar, L., 1999. Report on Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins. Manaus.
- Smith, J., Smith, P., 2007. *Environmental Modelling - an Introduction*, 1ª ed. Oxford University Press Inc., New York.
- Sontek/YSI, 2011. RiverSurveyor S5/M9 System Manual.
- Soto, Y.J.M., 2004. A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino antonina-paranaguá-pr.
- Souza, L.R.D.E., Cunha, A.C., Barreto, N.J.C., Brito, D.C., 2010. Aplicação do sistema hidrológico IPHS1 no Estudo de Chuva-Vazão em Aproveitamentos Hidrelétricos na Bacia Hidrográfica do Alto e Médio Araguari. In: *Tempo, Clima e Recursos Hídricos - Resultados Do Projeto REMETAP No Estado Do Amapá*. IEPA, Macapá/AP, pp. 97-118.
- Teledyne RD Instruments, 2007. Rio Grande ADCP User's Guide.

- Thompson, J.R., Polet, G., 2000. Hydrology and land use in a sahelian floodplain wetland. *Wetlands* 20, 639-659.
- Vincent, C.L., Demirbilek, Z., Weggel, J.R., 2002. Estimation of Nearshore Waves. In: *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army of Engineers, p. 45.
- Vörösmarty, C.J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., Syvitski, J.P., 2003. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change* 39, 169-190.
- Weissenberger, S., Lucotte, M., Houel, S., Soumis, N., Duchemin, É., Canuel, R., 2010. Modeling the carbon dynamics of the La Grande hydroelectric complex in northern Quebec. *Ecological Modelling* 221, 610-620.
- Wellmeyer, J.L., Slattery, M.C., Phillips, J.D., 2005. Quantifying downstream impacts of impoundment on flow regime and channel planform, lower Trinity River, Texas. *Geomorphology* 69, 1-13.
- Wilcox, C., Huertos, M.L., 2005. A simple, rapid method for mapping bathymetry of small wetland basins. *Journal of Hydrology* 301, 29-36.
- World Commission on Dams, 2000. *Dams and Development - A new framework for decision-making*. London & Sterling.
- Yang, S.-lun, Zhao, Q.-ying, Belkin, I.M., 2002. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze river and the influences of human activities. *Journal of Hydrology* 263, 56-71.
- Yang, S.L., Belkin, I.M., Belkina, a. I., Zhao, Q.Y., Zhu, J., Ding, P.X., 2003. Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57, 689-699.
- Yang, Z., Wang, T., Khangaonkar, T., Breithaupt, S., 2012. Integrated modeling of flood flows and tidal hydrodynamics over a coastal floodplain. *Environmental Fluid Mechanics* 12, 63-80.