

ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA FOZ DO RIO MATAPI – COSTA INTERNA ESTUARINA DO AMAPÁ

Dr. Alan Cavalcanti da Cunha

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – Centro de Pesquisas Aquáticas LABHIDRO/CPAQ/ IEPA. Rodovia JK km 10, Distrito da Fazendinha – Macapá-AP. CEP 68907-190. Prof. Modelagem de Sistemas Ambientais PPGBio/IEPA-UNIFAP-EMBRAPA-CI. E-mail: alan.cunha@iepa.ap.gov.br.

PhD. Antônio César Pinho Brasil Júnior

Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Eng. Mecânica – Laboratório de escoamentos Ambientais. CEP 70910-900. Brasília – DF. E-mail: brasiljr@unb.br.

Msc. José Gustavo Coelho

Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Eng. Mecânica – Laboratório de escoamentos Ambientais. CEP 70910-900. Brasília – DF. E-mail: josegustavo@unb.br.

Msc. Marcio Sousa

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – Centro de Pesquisas Aquáticas DGAS/CPAQ/ IEPA. Rodovia JK km 10, Distrito da Fazendinha – Macapá-AP. CEP 68900-000. E-mail: marcio.sousa@iepa.ap.gov.br.

Grad. Coline Floury.

Ecole Centrale de Lyon – 69130 Ecully France. E-mail: coline.floury@ecl2006.ec.lyon.fr.

Grad. Sidnei Belcides Avelar

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – Centro de Pesquisas Aquáticas LABHIDRO/CPAQ/IEPA. Iniciação Científica – CNPq. Rodovia JK km 10, Distrito da Fazendinha – Macapá-AP. CEP 68900-000. e-mail: sidnei.avelar@iepa.ap.gov.br.

Resumo. No presente trabalho foram realizadas simulações numéricas de escoamento no Rio Matapi, afluente do Rio Amazonas, próximo das cidades de Santana e Macapá. O objetivo geral da pesquisa foi avaliar o comportamento espaço-temporal do escoamento hidrodinâmico e de potenciais fontes poluentes na foz do Rio Matapi em confluência com o Rio Amazonas. Foram simuladas as condições dos escoamentos naturais que variam no tempo tal como aquelas causadas por movimentos de correntes de marés e que influenciam fortemente o comportamento dos constituintes passivos da água. Os principais resultados são as análises do comportamento hidrodinâmico do escoamento em regime transiente em 3D. Campos temporais de velocidade e de concentração de um poluente orgânico foram gerados. As informações podem ser úteis como base para o planejamento nas áreas de engenharia sanitária, saúde pública e disposição de águas residuárias industriais no Distrito Industrial de Santana-AP. A compreensão do fenômeno de dispersão de poluentes tem sido importante para melhor interpretar como algumas áreas críticas da zona estuarina tendem a se autodepurar, dispersando os poluentes da água que podem estar sob risco de contaminação.

Palavras-chaves: simulação 3D, escoamento superficial, regime transiente, maré, poluição, Rio Matapi, Rio Amazonas.

NUMERICAL STUDY OF THE SURFACE FLOW ON MATAPI RIVER MOUTH – INTERNAL AMAPÁ ESTUARINE COAST

Abstract. In this work numerical simulation of fluid flow of Matapi River, affluent of the Amazon River, on Amapá State estuarine coast is performed. The general aim of the present research is to study unsteady pollution release and hydrodynamic behavior nearby Santana and Macapá Cities, which are located at the Low Amazon River. Specific aim is to comprehend the spatial and temporal variability of the water quality parameters of the river and the dynamic process that influence the behavior of pollutants dispersion. Volumetric discharge conditions were simulated and can vary on time, such as water movement by tidal currents, and all passive constituents that can interact by dynamical kinetics one with each other. Experimental data such as discharge and water quality parameters are utilized. The field and laboratory parameters were used to support the comparison results and general analysis with simulation. The results of analysis provided useful information sanitary, public health and final pollution disposal planning. The comprehension of the phenomena is important to interpret how the several critical areas of the estuarine zone are being polluted or on risk of pollution.

Key-words: 3D simulation, river flows, unsteady river pollution, tidal influence, Matapi River, Amazon River.

1. Introdução

Nos sistemas fluviais amazônicos tem sido necessária a busca por um melhor entendimento sobre o comportamento dos processos de assimilação e dispersão de resíduos e efluentes lançados nos recursos hídricos. Tem se constituído um desafio enorme saber lidar com procedimentos de gestão e monitoramento sistemáticos desses corpos de água, principalmente em vista da falta de infra-estrutura de saneamento básico e em função dos elevados níveis de impactos ambientais sofridos pelos recursos hídricos em áreas urbanas, periurbanas e industriais próximas, como é o caso do Rio Matapi (Cunha *et al.*, 2004).

Em se tratando de monitoramento ou controle do lançamento de efluentes urbanos e industriais (áreas de risco de contaminação ambiental, como o Distrito Industrial de Santana) em rios da Amazônia estuarina e sob efeito de maré, há um interesse particular em vista de que a simples presença do mesmo já justificaria a necessidade de se implantar um sistema de controle, monitoramento e fiscalização, com o objetivo de manter certos níveis e padrões da qualidade e quantidade da água, em especial aqueles preestabelecidos por classes dos corpos de água preconizados pelo (Conselho Nacional do Meio Ambiente (Nova Resolução CONAMA 357).

Além disso, o tratamento prévio de esgotos urbanos e de resíduos industriais é um fator fundamental para a conservação dos corpos de água naturais. E na Amazônia este tem sido apontado como um problema sério a ser resolvido, ao mesmo tempo em que se desconhece quase que totalmente as características autodepurativas dos corpos de água nessas regiões. Mesmo em nível de Brasil pouco se tem estudado sobre como se comportam tais resíduos nesses mesmos corpos de água. É mais fácil determinar padrões de lançamento de resíduos do que determinar a capacidade autodepurativa dos corpos de água.

Do ponto de vista teórico e do gerenciamento e controle de poluição dos recursos hídricos, em condições de abundância e uso pouco intensivo da água como no Rio Matapi, são desnecessários maiores cuidados com o controle, tanto em termos de quantidade quanto de qualidade. Mas estudos realizados por Cunha (2003), Cunha *et al.* (2001), têm demonstrado desde então uma significativa alteração da qualidade da água em rios próximos desta área costeira de Macapá e Santana, principalmente quando se adentra rio acima em áreas urbanas e periurbanas próximas (Cunha & Couto, 2002). Portanto, a constatação das ameaças e dos potenciais efeitos antrópicos negativos sobre os corpos de água estudados suscitaram a realização do presente estudo, buscando uma abordagem um tanto quanto simplificada inicialmente para os padrões amazônicos, partindo-se da abordagem e uso da modelagem matemática ou numérica aplicada aos recursos hídricos e escoamentos ambientais, com base em experimentação e monitoramento de algumas variáveis importantes *in loco*.

Das abordagens principais implementadas no presente trabalho de pesquisa, considerou-se uma linha de estudo regida pela *hidrodinâmica e dispersão de poluentes no Rio Matapi*, em especial na zona de influência que limita o Distrito Industrial de Santana, desde sua foz até aproximadamente 7 km acima (Porto do Céu), indicada pela Figura-1:

- a) Abordagem experimental prévia – uso de dados e informações obtidas em campo ou experimentalmente, tais como a quantificação de descarga líquida e de parâmetros da qualidade da água, durante um ciclo de maré (aproximadamente 12,6 horas) em uma seção previamente escolhida – Local denominado de Balsa;
- b) Abordagem da simulação computacional – simulação numérica do processo físico da hidrodinâmica e da dispersão de poluentes no escoamento gerado (passivo ou escalar acoplado ao escoamento).

1.1. Objetivo

O objetivo geral da presente pesquisa proposta consiste na utilização de *software* numérico disponível no Laboratório de Energia e Ambiente –LEA/UnB (CFX 5.10 da ANSYS) para simular o escoamento transiente de superfície livre 3D tridimensional, com reação química de um composto orgânico – gasolina (decaimento de primeira ordem), próximo da foz do Rio Matapi em confluência com o Rio Amazonas.

1.2. Objetivos Específicos

- Simular as principais características do escoamento do Rio Matapi – AP, aplicando um modelo turbulento – no presente caso o SST (Tensor Shear Stress do CFX) para avaliar o comportamento hidrodinâmico e o comportamento da dispersão de plumas de poluentes, segundo o regime transiente naturais das correntes de marés;
- Analisar o comportamento de descargas líquidas e o comportamento das plumas de poluentes, ambas ao longo de um ciclo de maré (12,6 horas aproximadamente);

- Comparar alguns dos resultados da simulação com os dados e informações disponíveis na literatura e avaliar se o modelo capturou as principais características do escoamento real do Rio Matapi;

2. Caracterização Física da Área - Foz do Rio Matapi-AP

O domínio espacial escolhido foi somente o trecho de aproximadamente sete 7 km de extensão a partir da foz do Matapi, mostrado na Figura-1. O Distrito Indústria de Santana foi criado em 1982 e está localizado no Município de Santana a seis quilômetros do Porto de Santana e a 14 quilômetros da Capital do Estado, Macapá. Contribui para o desenvolvimento do Estado e possui uma área de 1.300 hectares, dentro da qual está situado o Loteamento Industrial, com área aproximada de 400 hectares, distribuída em 11 quadras, subdivididas em 96 lotes. Os lotes têm dimensões que variam entre 20.000 m², 10.000 m² e 5.000 m². Como limite está ao norte a linha do equador, ao sul o Rio Amazonas, leste Rodovia Macapá/Mazagão e a oeste o Rio Matapi (Figura-1).



Figura 1: a) *Direita acima* - Imagem de satélite da zona estuarina estudada; b) *Esquerda abaixo* - Foto aérea do Distrito Industrial de Santana às margens do Rio Matapi. No detalhe observa-se a foz do Rio Matapi, desaguando no Canal do Norte (Rio Amazonas). Cunha (2000).

Podemos caracterizar esses ambientes como ambientes costeiros de transição, onde se encontram áreas da bacia inundadas pela maré e influenciados por diferentes regimes energéticos, como as descargas de água da bacia de drenagem, ventos, ondas, etc. O trecho estudado do Rio Matapi, próximo de sua foz, pode ser considerado como bastante influenciado pelo regime de descarga líquida, sob efeitos de marés e precipitações pluviométricas sazonais, de acordo com algumas definições de estuários feitas por Miranda *et al.* (2002).

Pode-se dizer que a capacidade de dispersão, diluição ou autodepuração de cada corpo de água corrente é também uma característica particular e, em seu próprio contexto, altamente variável. Daí decorre a dificuldade de se estudar características generalizadoras desses processos. Velz (1984) afirma que o caráter dos recursos hídricos é dinâmico e complexo (por exemplo, ressaltam-se as regiões estuarinas, com suas variações espaciais e temporais), e que o equilíbrio estável no ambiente hidrológico é estabelecido através de interações complexas entre a água, o canal de escoamento e a cobertura de vegetação, os quais são relativamente variáveis no tempo (Victoria, 2003, Cunha 2006, Cunha, 2001; Cunha *et al.*, 2000a; Cunha *et al.*, 2002a,b).

Normalmente os processos que afetam a distribuição e a variabilidade de propriedades físicas, a concentração de substâncias naturais (salinidade, nutrientes dissolvidos e sedimentos em suspensão) e dos organismos biológicos, bem como a concentração de poluentes, devem ser abordados de forma interdisciplinar, de acordo com Miranda *et al.* (2002), nas componentes principais: a) **circulação, transporte e mistura entre as águas estuarinas e salgadas** (no caso do Matapi e o Rio Amazonas, entre águas doces com características visivelmente diferenciadas), b) efeitos ambientais sobre a flora e a fauna estuarina e c) transporte, erosão e deposição de sedimentos. Os autores reforçam que a dependência entre esses componentes é significativa em quase todos os processos que ocorrem em estuários. Além disso, a natureza dos sistemas de drenagem é radicalmente influenciada pela fisiografia (em uma bacia razoavelmente estável, os fatores determinantes como o clima, precipitação, temperatura, velocidade do vento, pressão de vapor, radiação solar, são altamente variáveis no tempo e no espaço), que induz a variações no escoamento e na capacidade de assimilação de resíduos (Siqueira, 1996; Siqueira *et al.*, 1997; Siqueira & Cunha, 2001; Lung, 1993 & Velz, 1984). Isto

influencia nas características dos canais, os quais têm um papel maior sobre a dispersão, diluição ou autodepuração dos corpos de água.

3. Metodologia

3.1. Pesquisa de Campo

Alguns estuários, como o Amazônico, são típicos de regiões de planície costeira que se formaram durante a transgressão do mar no Holoceno, que inundou os vales de rios. Esses estuários são relativamente rasos, raramente excedendo 30 m de profundidade. A área de seção transversal em geral aumenta estuário abaixo, às vezes de forma exponencial e a configuração geométrica tem a forma de “V”, em que a razão entre a largura/profundidade, em geral, é grande (Lung, (1993) e Miranda *et al.* (2002)). A foz do Rio Matapi e o Rio Amazonas, nos trechos estudados da zona estuarina estão um pouco fora desta classificação, com valores próximos de 30-40 m na foz do Matapi e confluência do Canal do Norte no Amazonas.

Os processos físicos comuns aos sistemas estuarinos são os movimentos cíclicos e a mistura entre massas de água de origens contrastantes (água doce e salgada), cujos resultados ocasionam em corpos de água a não homogeneidade e suas propriedades podem variar em elevadas faixas ou intervalos das escalas de espaço e tempo, ainda mais quando associado às forças geradoras de movimentos, como o as forçantes climáticas. No caso da presente pesquisa as simulações foram embasadas nas variações reais de medidas de descargas líquidas, as quais variaram entre 1000 e 1800 m³/s, e velocidades médias por volta de 0,5 a 1,7 m/s, aproximadamente (Ver Figura-2). A largura média trecho estudado do Rio Matapi variou na ordem de 200 a 300 m, dependendo da distância do ponto à foz. Profundidade média considerada na geometria foi por volta dos 7 m. O comprimento total do trecho simulado foi de 7 km de distância Cunha (2006). Na mesma Figura-2 observa-se, logo abaixo da seção de medida, valores de descarga líquida obtidas com o equipamento denominado ADCP¹ do CPAQ/IEPA.

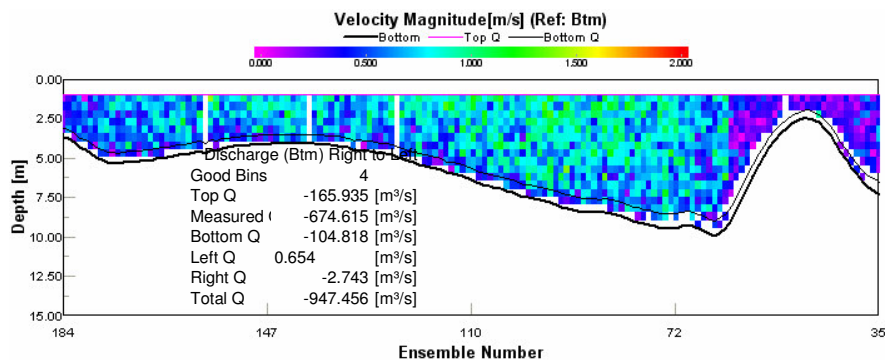


Figura 2: medição de descarga líquida (numa série de 170 em apenas um ciclo de maré, feitas com ADCP (600Hz) numa seção do Rio Matapi – AP (maio de 2006). O sinal negativo da vazão significa maré subindo.

Em duas ocasiões (2001 e 2006) foi possível realizar levantamentos pontuais sobre o comportamento hidrodinâmico (medição de descarga líquida - vazão) no Canal do Norte no Rio Amazonas e no próprio Rio Matapi, utilizando-se ADCP, as quais foram utilizadas para parametrização para as simulações. Neste caso, o intuito foi fundamentar as primeiras simulações numéricas para a dispersão de uma fonte poluente utilizando o CFX 5.10. Para as simulações numéricas, envolvendo a qualidade da água, restringiu-se à utilização de dados de Cunha (2006). Como informações complementares, são listadas abaixo as principais características dos parâmetros da qualidade da água do Rio Matapi, para efeito de informação complementar e para atuais e futuras comparações entre experimentos e simulações numéricas (ver Tabela-1):

¹ ADCP. A tecnologia ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) é um equipamento composto por uma sonda, com quatro transdutores e um “deck box”, onde os sinais são filtrados e transmitidos para um PC com um software específico que coordena as ações de todo o sistema, recebe os dados e disponibiliza em forma de gráficos, tabelas, etc. O princípio de funcionamento do equipamento é regido pelo movimento das partículas na água que causam variações na frequência de eco. O ADCP mede estas variações – o efeito Doppler – com uma função da profundidade para obter a velocidade da corrente em até 128 posições diferentes na coluna da água. Com o conhecimento da velocidade da corrente, da área da seção de medição e da profundidade da mesma, um programa de computador especialmente desenvolvido para o ADCP calcula a vazão total na seção de descarga ou de medição (Guyot et al., 1995 *apud* Benedito 2002).

Tabela-1: Dados médios temporais para análise de variação dos parâmetros de qualidade da água nos rios Matapi (todos pontos dentro do trecho estudado) - Média desde 1999-2004. Fonte Cunha (2003).

| Rio Matapi – Principais Pontos Sistemáticos de Coleta de Água – Santana/AP. Balsa – Medida de Vazão. | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----|--------------------|-------------|------------|-------------|-----------|---------------------|------------|
| Nome | Distância Foz (km) | SS (mg/l) | ST (mg/l) | OD (mg/l) | pH | Cond. Elét. (S/cm) | Turb. (NTU) | TDS (mg/l) | T água (°C) | T Ar (°C) | Colif. Fecais (NMP) | DBO (mg/l) |
| Mat. Foz | 0,0 | 47,2 | 204,0 | 5,4 | 6,6 | 44,6 | 51,8 | 34,1 | 30,6 | 29,0 | 993,1 | 3,0 |
| Igarapé Correa | 2,3 | 59,2 | 202,0 | 5,6 | 6,3 | 31,7 | 39,8 | 20,6 | 30,9 | 28,8 | 1523,5 | 2,0 |
| Pt. Balsa | 4,0 | 63,8 | 196,0 | 5,2 | 6,2 | 32,3 | 40,4 | 22,2 | 30,0 | 28,5 | 1696,7 | 2,1 |
| Serraria | 4,6 | 62,7 | 431,6 | 5,6 | 6,3 | 32,5 | 41,2 | 26,7 | 30,3 | 28,7 | 1253,3 | 2,4 |
| Porto Céu | 6,2 | 62,3 | 327,6 | 5,3 | 6,2 | 31,2 | 44,3 | 30,3 | 30,8 | 28,7 | 732,6 | 2,1 |

3.2. Digitalização do Domínio Computacional a Partir da Batimetria do Canal – Geração da Malha

Uma das principais dificuldades do trabalho foi elaborar uma malha computacional representativa oriunda de contorno natural do rio, como o indicado pela Figura-3 e converter arquivos de uma fonte ArcViv e ou ARcGIS para o CFX (*solidworks*) ou o gerador de malha do CFX. Essa foi uma limitação que dever ser futuramente superada nos próximos trabalhos. Contudo, a idéia inicial era que o gerador de malha do CFX tivesse êxito e facilidade na conversão dos dados ArcView e ou ArcGIS em extensão “.eps”. Isto é, que pudesse gerar uma curva primitiva para que a CFX interpretasse automaticamente. O que acabou não ocorrendo. Como de início não foi possível gerar facilmente a malha, utilizou-se um artifício para a geração aproximada do contorno real da batimetria do Rio Matapi, utilizando-se o formato do fundo pela “extrusão” da “Seção Reta da Balsa” da Figura –3a,b, obtidas a partir das medições reais de descarga e dados de batimetria no Rio Matapi.

O resultado do processo de extrusão adaptativo, para contornar o problema da geração de malha diretamente da Figura-3, está indicado nas Figuras 3a e 3b.

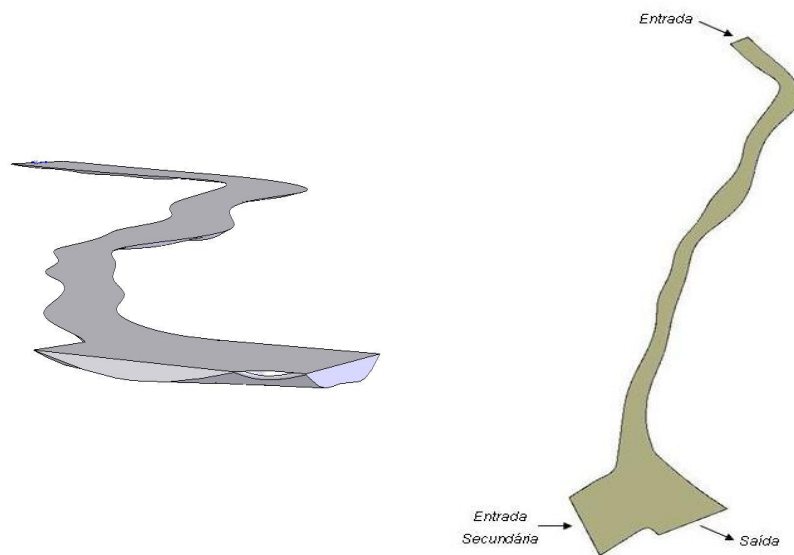


Figura 3: a) Rio Matapi desaguando no Canal do Norte (Rio Amazonas) “extrudado” e em perspectiva 3D – na interseção com o Canal do Norte, em frente, a Ilha de Santana; b) condições de contorno e iniciais do escoamento na referida simulação.

3.3 Pré-processamento e Geração da Malha Computacional 3D

A geração da malha foi executada no próprio pré-processador do CFX-5.10, resultando em uma estatística da malha com a seguinte estrutura: a) o número de nós gerados foi de 164.979 e o número de elementos tetraédricos foi de 820.854, tal como mostra a Figura-4.



Figura 4: Malha 3D gerada no CFX. Pré-processamento do Canal da Foz do Rio Matapi e encontro com o Canal do Norte, no Rio Amazonas.

3.4 Simulação do Escoamento e Dispersão de Plumas de Poluentes no Rio Matapi – AP com Uso do Modelo SST

A rigor, na presente pesquisa poder-se-ia utilizar o modelo turbulento $\kappa - \varepsilon$ padrão para a simulação do escoamento e dispersão de poluentes na água. Mas, em função de que em alguns trabalhos de escoamentos ambientais já iniciados com problemas de contorno e divergência numérica no LEA/UnB, foi sugerido o uso do Modelo SST, para melhor solucionar o problema de escoamento complexo em questão – hidrodinâmica com influência de marés e contornos complexos, de acordo com Mente (1994)².

Menter (1994) *apud* Moura (2003) propôs um modelo de duas equações designado para melhorar o comportamento dos modelos $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$. O ponto inicial para o desenvolvimento desse modelo foi a necessidade de resultados mais acurados para os escoamentos aeronáuticos que têm gradientes de pressão e descolamento da camada

² Menter, F. R. Eddy viscosity transport equations and their relation to the k - ε Model, AMMES Research Center, 1994.

limite acentuados. O modelo $\kappa - \varepsilon$ é um modelo muito robusto, porém, não consegue capturar descolamento da camada limite em casos turbulentos. Nesse ponto, o modelo $\kappa - \omega$ é mais realista, isto é, obtém melhores resultados perto da parede. Porém, em escoamentos livres, a equação de ω possui uma sensibilidade muito grande o que acaba inviabilizando a troca definitiva do modelo do $\kappa - \varepsilon$ pelo $\kappa - \omega$. Esse foi o ponto motivacional para o desenvolvimento do modelo SST (Menter, 2003)³. Para que a lógica desse modelo funcione, o modelo $\kappa - \varepsilon$ é multiplicado por uma função de mistura e adicionado ao modelo $\kappa - \omega$ também multiplicado por essa função de mistura. Então, impõe-se que a função tenha valor unitário na região logarítmica e gradativamente torne-se nula fora da mesma.

As especificações para esse modelo são:

Viscosidade turbulenta

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, (S_{ij} S_{ij})^{\frac{1}{2}} F_2)} \quad (1)$$

onde $(S_{ij} S_{ij})^{\frac{1}{2}}$ é uma medida invariante do tensor taxa de deformação e F_2 é uma das funções de combinação e é determinada por:

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{B^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (2)$$

A formulação das funções de mistura F_1 e F_2 é baseada na distância até a parede e nas variáveis. As funções de mistura têm como característica a delimitação de zonas aonde cada modelo irá atuar. Através do valor encontrado para as funções, o modelo irá mudar a formulação nas equações de transporte, onde a primeira função de mistura (F_2) é responsável pela troca de modelos na formulação da viscosidade turbulenta e a outra função de mistura, F_1 (Equação-5) é responsável pela determinação das constantes do modelo, e pela troca de modelos na equação de transporte de ω (Noleto, 2006)⁴. F_1 é igual a 1, considerando afastado da parede (utiliza a função $\kappa - \varepsilon$) e é igual a zero quando considera a função próxima à parede (nesse caso, faz uso da função $\kappa - \omega$).

Equação de transporte para a energia cinética turbulenta k , é dada por:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{P}_k - \beta^* \rho \kappa \omega ; \quad (3)$$

onde:

$$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Rightarrow P_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho \kappa \omega) \quad (4)$$

Equação de transporte para ω é:

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} ; \quad (5)$$

onde F_1 é definida como:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{B^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} \kappa}{CD_{\kappa \omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (6)$$

³ Menter, F. R. Multscale model turbulent for turbulent flow, In: 24th Fluid Dynamic Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993.

⁴ Noleto, L. Comunicação pessoal. Estudo de escoamentos de cilindros. Simulação numérica híbrida e grandes escalas do escoamento turbulento em uma matriz de cilindros. Dissertação em elaboração (2005).

com $CD_{\kappa\omega 1} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$ e y é a distância da superfície de não deslizamento.

As outras constantes são todas oriundas dos modelos $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$ com alguns ajustes e são determinadas como: $\beta^*=0,09$, $\alpha_1=5/9$, $\beta_1=3/40$, $\sigma_{k1}=0,85$, $\sigma_{\omega 1}=0,5$, $\alpha_2=0,44$, $\beta_2=0,0828$, $\sigma_{k2}=1$ e $\sigma_{\omega 2}=0,856$. (Menter, 2003)⁵.

4. Resultados sobre a Simulação Numérica com o SST – CFX 5.10.

4.1 . Campos de Velocidade.

Na seqüência da Figura-5a e 5b são mostrados os campos de velocidades com as respectivas escalas. Contudo, as limitações sobre o conhecimento da hidrodinâmica e hidrologia locais levaram a algumas simplificações momentâneas. Desta forma, foi possível, dentro dos limites da pesquisa, observar o comportamento hidrodinâmico ao na superfície líquida longo de um ciclo completo de maré. A partir de medidas de vazão (ver Figura-2) com o ADCP, alguns parâmetros hidráulicos ou hidrodinâmicos puderam ser determinados *in loco* e utilizados para estimar as condições iniciais e de contorno necessárias para executar a modelagem do escoamento e simulação da dispersão de plumas de poluentes na água.

Na seqüência da Figura 5a e 5b são mostrados os escoamentos previstos pelas simulações, em que se percebe, inicialmente, um movimento de vazante (direção à foz), tempo $t = 30$ min, reversão do fluxo, $t = 150$ min, e refluxo (maré enchente), $t = 150$ min. Na mesma seqüência, Figura 5b, observa-se após um ciclo de maré, inicialmente, um movimento de enchente (direção contrária à foz), tempo $t = 480$ min, reversão do fluxo, $t = 570$ min, e refluxo (maré vazante, novamente), $t = 600$ min (aproximadamente 12 horas após o início do processo).

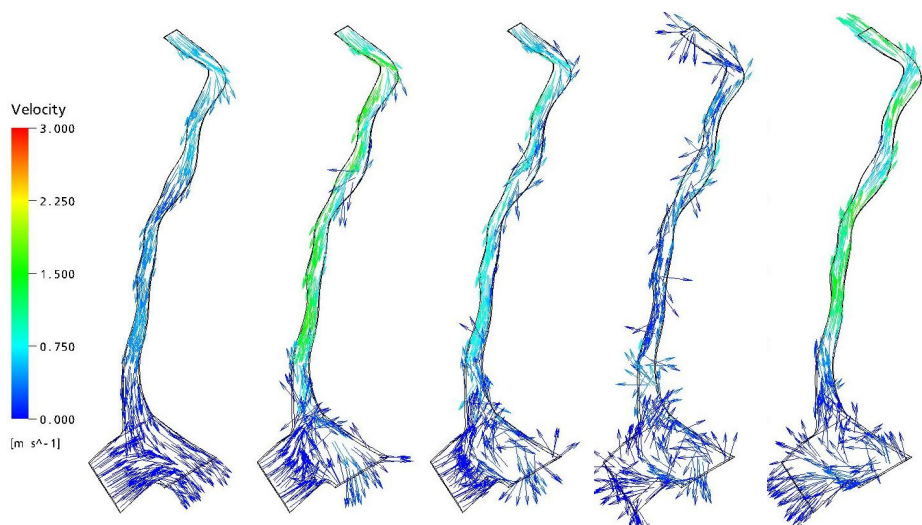


Figura 5a: campos de velocidades simulados em regime transiente no Rio Matapi: a) $t = 30$ min, b) $t = 60$ min, c) $t = 90$ min, d) $t = 120$ min e e) $t = 150$ min. Maré vazante, reversão do fluxo e início da enchente.

⁵ Menter, F. R. A scale-adaptative simulation model for turbulent flow predictions, 41st Aerospace Science Meeting & Exhibit, 6-9 January, Reno, Nevada. 2003.

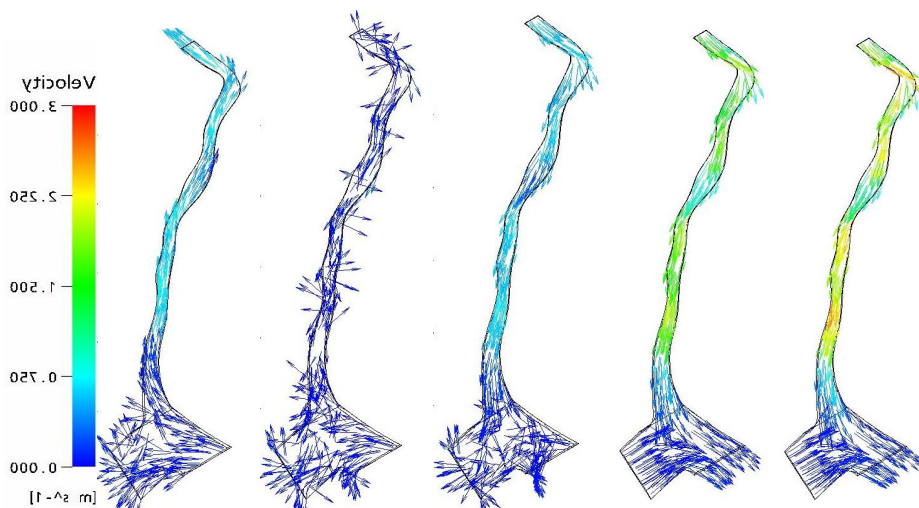


Figura 5b: campos de velocidades simulados em regime transiente: f) $t = 480$ min, g) $t = 510$ min, h) $t = 540$ min, i) $t = 570$ min e j) $t = 600$ min. Observa-se a final da enchente, reversão e vazante de maré no tempo.

4.2 . Campos de Concentração de Poluente Orgânico - Duas Fontes Poluidoras Contínuas Lançadas no Centro do Canal a Aproximadamente 1,4 km de Distância.

Analogamente, na seqüência da Figura-6a e 6b, são mostrados os campos de concentração de duas plumas de poluentes não-conservativas. As duas fontes poluidoras foram dispersadas ao longo de um ciclo completo de maré. Quando se observa, simultaneamente as Figuras 5a - 6a e 5b - 6b, é fácil avaliar que a coerência dos movimentos das plumas em função do escoamento nos mesmos instantes analisados. Na seqüência da Figura 6a e 6b são indicados os comportamentos das plumas de poluentes no escoamento. Desta forma, na Figura 6a, pelas simulações observa-se, inicialmente, o lançamento de duas fontes poluentes contínuas de forma pontual, no período de vazante (direção à foz), tempo $t = 30$ min, com dispersão da pluma, em função do fluxo, $t = 150$ min, e refluxo (maré enchente), $t = 150$ min. Na mesma seqüência, Figura 6b, observa-se a mesma característica, após um novo ciclo de maré, inicialmente, um movimento de enchente (direção contrária à foz), tempo $t = 480$ min, reversão do fluxo, $t = 570$ min, e refluxo (maré vazante, novamente), $t = 600$ min (aproximadamente 12 horas após o início do processo).

A seqüência indicada pelas figuras 5 e 6, demonstra as potencialidades do uso da ferramenta numérica para os estudos de escoamentos ambientais e de dispersão de poluentes em corpos naturais de água.

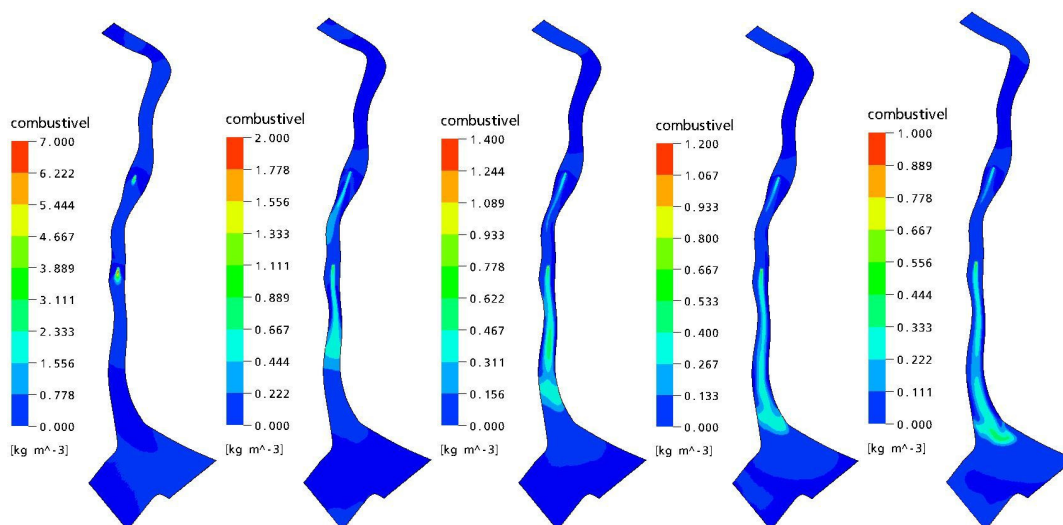


Figura 6a: campos de concentração de poluentes de duas fontes instantâneas: a) $t = 30$ min, b) $t = 60$ min, c) $t = 90$ min, d) $t = 120$ min e e) $t = 150$ min. Maré Vazante.

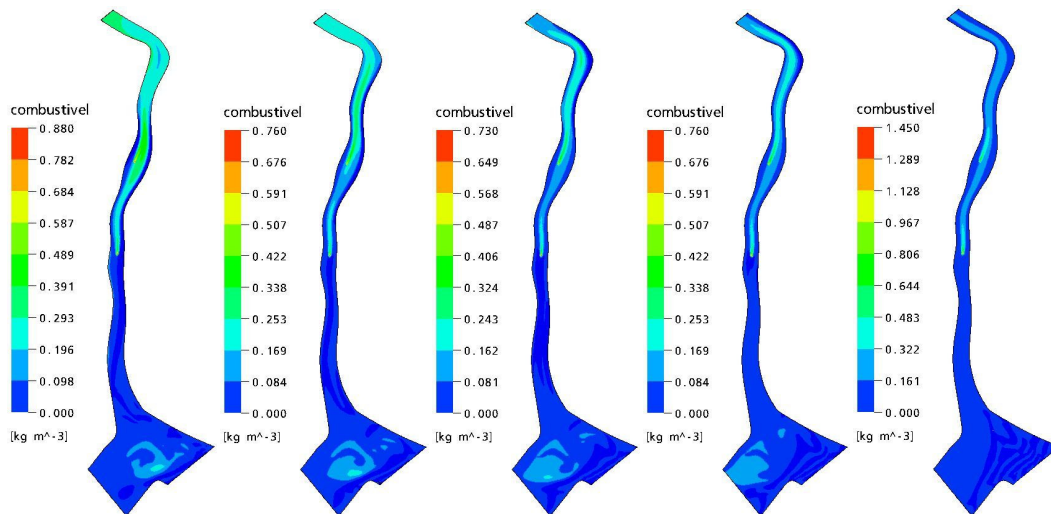


Figura 6b: campos de concentração de poluentes: f) $t = 480$ min, g) $t = 510$ min, h) $t = 540$ min, i) $t = 570$ min e j) $t = 600$ min. Maré enchente.

5. Conclusões

Foi feito um estudo preliminar, com o uso da simulação numérica, para avaliar o comportamento da hidrodinâmica (escoamento natural em canais abertos e de dispersão de poluentes no Rio Matapi. Neste aspecto a pesquisa apresenta uma relevância importante para geração de conhecimento dos ecossistemas aquáticos do Estado do Amapá e na Amazônia de modo geral.

Desta forma, podemos afirmar que as principais contribuições da presente pesquisa foram resumidas abaixo:

- 1) O presente estudo preliminar introduziu uma forte perspectiva para aprofundamentos de novas pesquisas na área, o que pode permitir o melhor embasamento de conhecimentos sobre esses sistemas físicos tão complexos e, ao mesmo tempo, servir como ferramenta de análise e estudos de cenários para a gestão ambiental no Rio Matapi e, por consequência, do **Distrito Industrial de Santana**, associando simulação numérica e experimentação, através de uma abordagem interdisciplinar útil e necessária para estes casos;
- 2) Verificou-se que, mesmo em um contexto um tanto limitado de investigação, que é possível avaliar **quantitativamente e qualitativamente** os principais componentes governantes dos fenômenos hidrodinâmicos (escoamento com superfície livre) e da dispersão de poluentes em escoamentos naturais em ambientes amazônicos;
- 3) O SST (CFX. 5.10, da ANCYS) mostrou-se **robusto e suficientemente capaz** de capturar os principais movimentos hidrodinâmicos do escoamento real esperado para o sistema fluvial em questão, em que pese a variação das grandezas físicas e químicas presentes no escoamento, no espaço e no tempo. Contudo, a presente pesquisa é considerada pelos autores uma análise ainda simplificada e de **caráter eminentemente qualitativo e prospectivo**, pois muitas considerações físicas foram feitas para simplificar a parte física do problema, e sem a preocupação excessiva quanto aos detalhes numéricos das simulações. Destaca-se o exemplo de que a variação da elevação do nível da água nos ciclos de maré é insignificante no processo, o que provavelmente veio superestimar as velocidades superficiais do escoamento mostradas nas Figuras 5a-b e provavelmente influenciou o processo de dispersão avaliado. Contudo, praticamente todos os demais parâmetros de entrada do modelo foram fundamentados em grandezas e características físicas, químicas, geométricas, hidrodinâmicas do escoamento real;
- 4) Foi utilizada uma aproximação matemática para a vazão, por meio de uma função senoidal (obtida a partir de medições físicas reais – Figura-2) como condição de entrada no modelo, bem como a inserção de grandezas cinéticas (taxa de decaimento de primeira ordem de um poluente orgânico da ordem de grandeza de concentração mostrada pela Tabela 1), faixa de variação de velocidade em certa seção do escoamento, descarga líquida variando no tempo, etc, para compor as condições de contorno e iniciais do escoamento (pré-processamento da modelagem).

- 5) Além do estudo da variação do escoamento hidrodinâmico, verificou-se também o comportamento de duas plumas de poluentes lançadas (passivos do escoamento lançados em dois pontos distintos do domínio computacional (ver figuras 6 a-b), durante um ciclo completo de maré;
- 6) Ficou demonstrado que a ferramenta computacional é interessante para se estudar esse tipo de fenômeno complexo. Além disso, é útil para analisar as escalas de espaço e de tempo de deslocamento de plumas de poluentes. Exemplo de aplicação são os potenciais acidentes com derramamento de contaminantes químicos, físicos ou biológicos na água no Distrito Industrial, o que é bastante provável que possam ocorrer em curto ou médio prazos e que podem exigir tomada de decisão quanto aos procedimentos de mitigação de impactos ambientais;
- 7) As principais considerações e limitações da presente pesquisa estão relacionadas com as dificuldades inerentes à obtenção de uma série de dados hidrológicos mais precisos, bem como um maior detalhamento da batimetria. Neste aspecto, há uma tendência para que os futuros estudos nesta área tenham um maior aprofundamento na análise detalhada dos aspectos numéricos associados com os aspectos experimentais;
- 8) Finalmente a pesquisa também permitiu aos pesquisadores envolvidos iniciar um processo de investigação por via de avaliar as potencialidades das ferramentas da simulação numérica aplicadas aos escoamentos em correntes naturais como os rios amazônicos e, ao mesmo tempo, possibilitar que tais estudos possam ser acopladas aos experimentos de campo ora inicialmente empreendidos. Tais ferramentas abrem fortes perspectivas de aprofundamento em uma área sensível e pouco investigada da Engenharia Ambiental na região, sobre a qual pesam muitas lacunas de conhecimento a respeito dos ecossistemas aquáticos e ao meio ambiente de modo geral. Neste aspecto, esta tende a se tornar em uma forte ferramenta para subsidiar políticas públicas de meio ambiente e de gestão de recursos hídricos regionais.

6. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro da pesquisa cedido pelo CT-Hidro, CNPq e IEPA, apoio do LAQ/SEMA, CAESA, LEA/UnB e FINATEC. Essas instituições, em conjunto, permitem a integração de conhecimento relevante às tomadas de decisão vinculadas à qualidade de água.

7. Referências

Chapra, S. C. *Surface Water-Quality Modeling*. McGraw-Hill. Texas, EUA. 844 p. 1997.

Cunha, A. C. *Monitoramento, Parâmetros e Modelos de Qualidade da Água*. Macapá/AP: Secretaria de Estado do Meio Ambiente - AP. 83 p. 2000.

Cunha, A. C, Cunha, H. F. A. & Siqueira, E. Q. Water Pollution Survey in Rivers of the State of Amapá–Brazil. In: V Workshop Ecolab, Nov., 19-25. Macapá-AP/Brazil. p 315-323. (2000a).

Cunha, A. C, Cunha, H. F. A. & Siqueira, E. Q. “Diffuse Pollution Survey in Rivers of Southeast of Amapá State – Brazil”. In: 5th International Conference on Diffuse/Nonpoint Pollution and Watershed Management, Milwaukee, Wisconsin, Proceedings, EUA, June, 10-15. CD-ROM. (2001).

Cunha, A. C. “*Levantamento de Parâmetros Físico-químicos e Hidráulicos para a Avaliação da Qualidade da Água em escoamentos naturais – Desenv. do Distrito Industrial na Bac. do Rio Matapi*”. Rel. Na. p/ CNPq/IEPA. Macapá-AP, Set., 58p. (2001).

Cunha, A. C. & Cunha, H. F. A.: “*Monitoramento de Águas Superficiais em Rios Estuarinos do Estado do Amapá sob Poluição Microbiológica*”. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Boletim. Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências Naturais, Belém-PA, vol.1, N. 1, p. 141-148, jan-abr, 2005.

Cunha, A. C., et al.: “*Approaches to Evaluation of Self-purification in Estuarine Rivers of Southeast of Amapá State – Brazil*”. ABEQUA -VIII Congresso da Associação Brasileira do Quaternário:Período. Local: Mariluz, Imbé - Rio Grande do Sul. (2002)

Cunha, A. C., et al.: “*Qualidade microbiológica da água em rios de áreas urbanas e periurbanas no Baixo Amazonas: o caso do Amapá*”. Artigo Técnico, Revista da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, Out-Dez, Vo. 9, N. 4, p-322-329, 2004.

Cunha, A. C.. *Simulação Numérica da Hidrodinâmica da Costa Estuarina Urbana e Periurbana de Macapá e Santana - AP: Um Subsídio à Gestão de Recursos Hídricos*. Relatório Técnico – Pesquisador Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. 30 p. Jan, 2006.

Lung, Seng-Wu. *Water quality modeling*. Vol III: Application to Estuaries. CRC Press, Inc.USA. 194 p. (1993).

McCutcheon,S.C.; French,R.H: *Water quality modeling: transport and surface exchange in rivers*. v. 1.Series Edit. CRC Pres. Inc. Boca Raton, Florida. EUA. 334p. (1989).

Miranda, L. B. et al. *Princípios da Oceanografia de Estuários*. Editora Edusp-SP. (2002).

Moura, M. D. *Modelagem e simulação numérica do escoamento turbulento em tubos de sucção de turbinas*. Dissertação de Mestrado Eng. Mecânica – UnB. Brasília, Distrito Federal – DF. 157 p. 2003.

Siqueira, E. Q; Cunha, A. C. “*Re-oxygenation coefficient in model QUAL2E: Prediction methodology*”. Int. Stormwater and Urban Water Syst. Modeling Conf. Monog. 9 in the Series, Proc. of the Conference on Stormwater and Urban Systems Modeling, Toronto, Ontario, Guelph. Edited by Willian James. Computational Hydraulics International (CHI). Período 24-25 de fevereiro de 2000. p. 153-160. (2001).

Silva, M. S.; Kosuth, P. 2001 – *Comportamento das vazões do rio Matapi em 27.10.2000*. CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8. Imbé-RS. Resumos, ABEQUA, p. 594-596.

Velz, C. J. *Applied Stream Sanitation*. A Wiley-Interscience Publication. Second Edition. Michigan, EUA. 799 p. (1984).

Victoria, R. L. *O papel dos sistemas fluviais amazônicos regional e global de carbono: evasão de CO₂ e interações entre os ambientes terrestres e aquáticos*. Piracicaba-SP. CNEM-USP. 22 p. (2003).