

## Modelagem e Simulação do Escoamento e Dispersão Sazonais de Agentes Passivos no Rio Araguari AP: Cenários para o AHE Ferreira Gomes-I-Amapá/Brasil

Alan Cavalcanti da Cunha<sup>1</sup>, Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha<sup>1</sup>, Luis Aramis dos Reis Pinheiro<sup>2</sup>

alancunha@unifap.br, helenilzacunha@unifap.br, aramisrp@gmail.com

Recebido: 31/01/11 – revisado: 07/05/12 – aceito: 22/08/12

### RESUMO

A pesquisa trata de simular a hidrodinâmica e a dispersão de agentes passivos na água aplicados ao estudo de impacto ambiental (EIA) para aproveitamento hidrelétrico (AHE) de Ferreira Gomes I, localizado no médio rio Araguari – Amapá/Brasil. Objetivo é analisar as mudanças físicas relevantes do escoamento do rio como um fator abiótico decisivo para o equilíbrio do ecossistema aquático do reservatório futuramente formado. Além do escoamento são analisados os processos físicos de dispersão de agentes passivos na água, especificamente representados por cargas contínuas inertes, antes e após o enchimento do reservatório. A metodologia consistiu no uso de um sistema computacional CFX 11.0 para modelar e simular numericamente o escoamento turbulento. O modelo de turbulência utilizado foi o k-ε padrão. Malhas computacionais em 3D foram geradas para representar a geometria do sistema hidráulico antes e após a construção do reservatório. Nos cenários ambientais foram utilizados quatro valores de vazões sazonais em regime permanente: máxima, média, mínima e “ecológica”. Os resultados indicaram significativa alteração tanto das características geométricas do canal natural quanto do comportamento hidrodinâmico dos campos de dispersão de agentes passivos na água. Verificou-se que o período hidrológico sazonal menos chuvoso pode ser o mais crítico no “controle” das vazões de montante do AHE Ferreira Gomes I, principalmente pela operação da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHCN).

Como conclusão observou-se que os cenários ambientais indicam a importância de se utilizar o critério hidrodinâmico na adoção de um regime de vazões “ecológicas”, pois os processos dispersivos de agentes passivos na água estão fortemente vinculados com os ecológicos e com manutenção dos ciclos biogeoquímicos na água (taxa de renovação, regime de escoamento: lótico ou lêntico). Os resultados mostram-se úteis na aplicação de métodos determinísticos objetivos para representar o escoamento, quando se considera as forças abióticas no ecossistema aquático de inundação do reservatório e aos usos múltiplos da água.

**Palavras-chaves:** Hidrodinâmica, dispersão de poluentes. Sazonalidade. Simulação. Vazão ecológica; AHE, Amapá.

### INTRODUÇÃO

Os rios têm provisto a base para o desenvolvimento socioeconômico da humanidade, convivendo com os benefícios e dificuldades promovidos pelos ciclos hidrológicos que cada período do ano fornece (AMORIM e LUZ, 2006). Na maioria das vezes as águas dos rios são utilizadas para propósitos domésticos, industriais, agrícolas e principalmente para a construção de barragens de geração de ener-

gia hidrelétrica (PAULO, 2007, PINHEIRO; CUNHA, 2010).

Como consequência, pode ocorrer significativo impacto sobre algumas das complexas interações entre o meio biótico, abiótico e socioeconômico, tais como mudanças do comportamento do escoamento do corpo d’água, dinâmica de assoreamento e processos de sedimentação em reservatórios. Um dos exemplos mais interessantes são as interações tróficas nos ecossistemas aquáticos que dependem de variáveis como o número de *links* da cadeia alimentar, ou a força e a posição da perturbação imposta sobre a cadeia (FRAGOSO JR, 2009).

Os rios possuem características hidrológicas, morfológicas, químicas e ecológicas (espécies aquáticas) bastante variáveis, especialmente por serem dinâmicas, algumas de difícil medição e influencia-

<sup>1</sup> Curso de Ciências Ambientais - Universidade Federal do Amapá – UNIFAP

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá/ Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis – CIE

das pela sazonalidade climática ou localização geográfica.

A vazão desempenha um papel fundamental na ecologia dos ecossistemas lóticos, constituindo-se em fator determinante na estrutura e diversidade das comunidades bióticas. A modificação do regime hidrológico altera a velocidade, profundidade escoamento, regime de transporte sólido e morfologia do leito, temperatura e qualidade da água (PAULO, 2007).

Em ambientes aquáticos os processos que determinam a heterogeneidade, entendida como diversidade estrutural do ambiente, estão intimamente ligados ao regime fluvial, que determina fatores como profundidade, velocidade da corrente, tipo de substrato e forma do canal. Segundo Benetti *et al.* (2003) *apud* Paulo (2007) estes são: a) **corrente** (hidrodinâmica), que afeta a distribuição de muitas espécies de organismos aquáticos que habitam zonas mais lentas ou mais rápidas dos rios. É importante para o transporte de nutrientes e a remoção de dejetos. Segundo Amorim e Luz (2006) atualmente há um consenso de que a vazão ecológica deve variar durante o ano, aproximando-se do regime hidrológico natural, que é particular para cada rio - “paradigma das vazões naturais”. O regime hidrológico fluvial é caracterizado pela variabilidade dos fluxos, tanto no sentido de montante para jusante como no sentido vertical e lateral, além da dimensão temporal. Mas, apesar de diversos estudos, a ecologia não tem conseguido fornecer subsídios imediatos para soluções de problemas ambientais, com previsões seguras; b) **substrato**, que em leitos de rios de áreas montanhosas e nascentes é comum encontrar, como pedras e pedregulhos. Estes, por sua vez, são importantes para a desova de muitas espécies que os utilizam para proteger seus ovos da correnteza e dos predadores. A disponibilidade de substratos adequados influencia a distribuição e abundância de peixes; c) **temperatura**, que afeta o metabolismo dos organismos, a disponibilidade de alimentos, seu consumo e consequentemente exposição a predadores; d) **oxigênio dissolvido** OD e consumido (DBO), são considerados fatores limitantes da vida nos ecossistemas aquáticos, dependendo principalmente das correntes e têm papel fundamental de renovar a água provendo o necessário gradiente na concentração de oxigênio dissolvido requerido para a sobrevivência dos peixes e seres aquáticos superiores. Muitos organismos não conseguem satisfazer suas necessidades de oxigênio em vazões baixas e altas temperaturas.

Já o solo, que podendo ser desagregado e alterado pelo desflorestamento e formação do reser-

vatório, promove um intenso processo de sedimentação. Em áreas de declividade acentuada, as partículas são transportadas para locais mais planos, onde na presença de escoamentos mais lentos se depositam (SOBRINHO, 1996). A deposição de sedimentos nas margens e leitos causa a modificação da seção transversal diminuindo a profundidade do rio, além de provocar alterações no comportamento dinâmico, distribuição e crescimento/consumo de organismos aquáticos. A modificação destes fatores em uma comunidade de fitoplanctons pode ocasionar impactos como a eutrofização do reservatório e transformações bioquímicas das águas superficiais (CUNHA, 2012) e dos sedimentos (FRAGOSO JR, 2004).

Para entender parte desses processos físicos e ecológicos é necessário o uso e aplicação de modelos para permitir análises genéricas e explorar toda a complexidade envolvida nos mesmos processos. Os modelos utilizados no gerenciamento hídrico e ambiental geralmente descrevem o comportamento de um sistema, isto é, são utilizados para reproduzir um fenômeno de interesse sujeito a diferentes entradas. Entretanto, também podem ser utilizados para avaliar melhores soluções quando o interesse é otimizar aspectos econômicos, sociais ou ambientais, normalmente indicados por metas de qualidade da água, otimização de geração de energia e custos (FRAGOSO JR, 2000).

De acordo com Fragoso Jr. (2009) a aplicação de modelos está presente em diferentes fases do gerenciamento de recursos hídricos, dependendo do propósito do estudo: a) identificação do estado atual da bacia ou trecho estudado, (estimativa de geração de resíduos e de eventos chuvosos e não chuvosos críticos, avaliação do uso das águas, ocupação do espaço físico); b) quantificação do volume de carga gerada pela bacia; c) estado do ecossistema aquático (nutrientes, monitoramento de vazão e a amostragem de indicadores de qualidade da água); d) testes de alternativas (projeção dinâmica do crescimento de populações, uso do solo e cargas de nutrientes em cenários futuros); e) seleção de cenários que promovam os menores impactos sobre os ecossistemas aquáticos e maximize os benefícios socioambientais e econômicos; f) aplicação, monitoramento e manejo de bacia (variáveis ecológicas no ecossistema aquático), etc. O foco deste estudo será para a seleção de cenários dependentes da vazão.

O motivo pelo qual se optou por estudos de cenários de vazão no presente estudo foi em decorrência de que este último parâmetro hidráulico tem sido negligenciado e desconectado dos fatores bióticos aquáticos em estudos de impactos ambientais

de aproveitamentos hidrelétricos. Desta forma os estudos hidrodinâmicos acoplados aos fenômenos de dispersão de agentes passivos na água são estratégicos para a gestão de recursos hídricos, especialmente onde há pouca informação ou disponibilidade de dados.

Além disso, a análise de cenário de vazão integrada a processos de dispersão de agentes passivos do escoamento permite um melhor entendimento sobre a dinâmica espacial e sazonal dos fenômenos físicos intrínsecos às modificações do corpo hídrico impactado, antes e após o enchimento do reservatório. Deste ponto de vista é possível avaliar como ocorrem os processos dispersivos em períodos considerados críticos do escoamento ao longo de períodos sazonais, especialmente durante a estiagem. Neste período seco há uma preocupação recorrente quanto à aplicação de critérios “ecológicos” de outorga de uso múltiplo de recursos hídricos.

Portanto, os cenários hidrodinâmicos integrados aos de qualidade da água podem ser consideradas ferramentas úteis de suporte a decisão para os planos básicos de ecossistemas aquáticos na bacia hidrográfica em questão. Na presente pesquisa utilizou-se o software CFX 11.0 por estar disponível no Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical (PPGBIO) e ao Laboratório de Modelagem e Simulação do Curso de Ciências Ambientais (CCAM/UNIFAP) desde 2009 para o desenvolvimento de estudos hidrodinâmicos e qualidade da água em bacias hidrográficas.

#### **Modelos de funcionamento de ambientes fluviais: conceito do contínuo fluvial**

De acordo com Amorim e da Luz (2006) o conceito do contínuo fluvial (*River Continuum Concept - RCC*), proposto por Vannote *et al* (1980) *apud* Amorim e da Luz (2006) é baseado na teoria do equilíbrio de energia da geomorfologia fluvial, a qual afirma que desde a nascente até a foz as variabilidades físicas dentro do sistema fluvial apresentam um contínuo gradiente de condições. Neste conceito, os processos fluviais são destacados apenas nas dimensões longitudinal e temporal, desprezando os efeitos da profundidade e das inundações laterais sazonais.

As comunidades biológicas fluviais se ajustam a este gradiente de condições de forma a utilizar eficientemente a entrada de energia, com o mínimo de perda. Para isso, comunidades que se estabelecem a jusante dão continuidade aos processos ineficientes de montante. Além da busca por eficiência energética ao longo do rio, existe também a

manutenção do equilíbrio do fluxo de energia no decorrer do tempo. As comunidades biológicas formam uma seqüência de espécies sincronizadas que se revezam sazonalmente. Quando uma espécie completa seu crescimento ela é substituída por outra, que exerce a mesma função, distribuindo ao longo do ano a utilização da energia (AMORIM e LUZ, 2006). O conceito do contínuo fluvial descreve a estrutura e função de comunidades ao longo de um sistema fluvial sem interferências antrópicas, fornecendo subsídios para a integração de processos bióticos e abióticos.

Statzner e Higler (1985) *apud* Amorim e Luz (2006) defendem modificações da base teórica do RCC(*River Continuum Concept*), pois alguns dos princípios do conceito ou estão em conflito com o conhecimento atual da ecologia fluvial ou estão abertos às várias interpretações. Os referidos autores sugeriram a exclusão dos princípios da maximização da utilização da energia por revezamento de espécies; da ausência de sucessão e invariância temporal em comunidades lóticas e dos mecanismos específicos comandando a alta diversidade biótica em regiões médias do rio. O conceito da descontinuidade serial (CDS) foi proposto por Ward e Stanford (1983) como uma extensão do conceito do contínuo fluvial. No modelo de Vannote (1980), o CDS prevê respostas de ecossistemas fluviais para fluxos regulados e propõe que os rios têm uma tendência para recuperar suas condições naturais a partir de certa distância de uma barragem (BRITO, 2008; BÁRBARA, 2006).

Ward e Stanford (1995) estenderam o conceito acrescentando a dimensão lateral, além da longitudinal. Stanford e Ward (2001) apresentaram medidas de distâncias descontínuas para nove rios em seis países confirmado a predição do conceito. A expansão baseou-se em estudos sobre planícies inundáveis que passaram a ocorrer a partir de 1980, tal como o conceito do pulso de inundaçāo.

#### **Conceito do pulso de inundaçāo**

O regime hidrológico fluvial é caracterizado pela variabilidade dos fluxos, tanto no sentido de montante para jusante como no sentido vertical e lateral, além da dimensão temporal. Nos períodos secos as águas fluem pelo leito de vazante variando até o leito menor, e nas cheias, o nível do rio varia entre o leito menor e o sazonal maior que é regularmente ocupado, pelo menos uma vez ao ano, alagando a planície de inundaçāo. O leito maior excepcional apenas é submerso nas enchentes, em intervalos irregulares.

Assim, baseado nas características fluviais de grandes rios tais como Amazonas e Mississipi, o conceito do pulso de inundação foi formulado a partir de discussões sobre grandes rios e a aplicabilidade do Conceito do Contínuo Fluvial em grandes sistemas rio – planície de inundação (JUNK *et al.*, 1989). Este conceito enfoca as trocas laterais de água, nutrientes e organismos entre o canal do rio e a planície conectada.

De acordo com Junk *et al* (1989), as flutuações de nível d'água ou os pulsos de inundação periódicos controlam os sistemas de planície que se ligam aos corpos d'água por intermédio de uma zona úmida transicional, determinando a dinâmica espacial e sazonal de comunidades de plantas e animais, produção primária e secundária e ciclo de nutrientes.

Algumas respostas sobre como ocorrem esses fenômenos podem ser explicadas à luz do entendimento das variações espaciais e sazonais da hidrodinâmica do escoamento (PINHEIRO *et al.*, 2010).

### Importância ecológica das planícies inundáveis

De acordo com Christofeletti (1981), a alternância entre inundação e emersão é o aspecto fundamental que controla a erosão e a deposição nas planícies definindo comunidades bióticas, processos biológicos e ambientes característicos em ecossistemas fluviais. Allen (1970) *apud* Amorim e Luz (2006) descreveu o processo de inundação das planícies em uma seqüência de quatro fases (transbordamento das águas do rio para as planícies de inundação; enchimento das planícies de inundação; esvaziamento das planícies de inundação e secamento das planícies de inundação).

Os ambientes rio-planície de inundação são caracterizados pela transição entre os ecossistemas aquático e terrestre, refletindo no desenvolvimento de vegetação específica. A disponibilidade de áreas úmidas em períodos que ocorrem naturalmente durante o ano permite a germinação de espécies da flora aquática e anfíbia de ciclo curto.

As espécies vegetais mais tolerantes à umidade se desenvolvem próximas ao curso d'água e as espécies características de solos bem drenados crescem próximas à zona terrestre (OLIVEIRA, 2004).

A vegetação ciliar tem papéis importantes na biodiversidade do rio, além de controlar o excesso de nutrientes e sedimentos que alcançam o seu leito, por meio do alagamento sazonal das planícies, forma corredores que interligam os remanescentes de matas (PEDRALLI; TEIXEIRA, 2003).

A inundação das áreas marginais auxilia o processo de decomposição, pois no leito do rio existem maiores níveis de oxigênio dissolvido. A matéria orgânica degradada e acumulada no solo durante o período seco é incorporada à água, retardando o assoreamento das lagoas marginais, pois evita o acúmulo de material nestes ambientes. Além disso, propicia a colonização de macroinvertebrados e microorganismos que incorporam nitrogênio no material em decomposição (THOMAZ *et al.*, 2003).

Ao iniciar o decréscimo do nível d'água, os ambientes lacustres desconectam-se do leito principal do rio, drenando sedimentos e aumentando o nível de oxigênio dissolvido nas lagoas (Henry, 2003). No decorrer do período de baixos níveis fluviométricos as plantas aquáticas que se beneficiaram das áreas alagadas no período de cheia morrem e liberam nutrientes para as áreas inundáveis que estão expostas. Esses nutrientes são acumulados no solo e utilizados pela vegetação terrestre que irá se desenvolver (THOMAZ *et al.*, 2003).

A entrada de sedimentos e de matéria orgânica fornece a matéria prima que cria a estrutura física do habitat, os substratos e os locais de desova e armazena os nutrientes que sustentam as plantas e os animais aquáticos (BARON *et al.*, 2003). Durante as cheias, a retenção de sedimentos e matéria orgânica pelas raízes da vegetação forma microhabitat para pequenos animais e outras plantas que se fixam nesse substrato (PEDRALLI; TEIXEIRA, 2003).

Assim como a vegetação, os ciclos biológicos da fauna estão sincronizados com as variações sazonais do regime hidrológico. As características das vazões, como as amplitudes, durações, freqüências, taxas de recessão e ascensão e a época em que ocorrem as cheias e secas, acionam processos migratórios com a finalidade de reprodução ou busca por alimento. Além disso, as inundações facilitam a distribuição de organismos pelo rio, já que as suas águas podem conectar-se com lagoas localizadas nas planícies fluviais (BARON *et al.*, 2003), proporcionando diversidade de habitat para peixes adultos e condições de sobrevivência para alevinos.

Quando inicia o período de vazante as águas escoam das planícies para o leito do rio, desconectando lagoas marginais e provocando o isolamento de alguns animais que não conseguem fugir na mesma velocidade das correntes, tornando-se alimento necessário para predadores maiores, além de tornar as condições do ambiente favoráveis a espécies da fauna e flora que são diferentes dos períodos de cheia.

A alternância na situação do ambiente – períodos de cheia e seca – fornece oportunidade a

todos os organismos, em épocas distintas, de sobrevivência no meio. Assim, todos os processos biológicos que ocorrem no ecossistema são interligados e sincronizados com fatores abióticos. Qualquer alteração no padrão da dinâmica fluvial desarmoniza o sistema rio - planície de inundação desregulando o fluxo de nutrientes e sedimentos e descontrolando a relação entre o regime hidrológico e o ciclo de vida da fauna e flora. Esta influência foi registrada no Médio Rio Araguari, a montante e próximo do reservatório da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, especialmente em relação à distribuição e ocorrência de espécies planctônicas no eixo espacial e sazonal (CUNHA, 2012).

### **Aplicabilidades dos conceitos na determinação de vazões ecológicas**

A implantação de barragens em um curso d'água tem diversas finalidades voltadas para o desenvolvimento econômico e social de uma região, tais como geração de energia elétrica, retenção de água para irrigação, abastecimento de cidades, controle de inundações etc (CUNHA e al., 2010).

Para minimizar os problemas gerados pela implantação de barragens vêm sendo desenvolvidas metodologias para determinar quanta água deve ser mantida no leito do rio a fim de proteger o ecossistema aquático. Porém, diversos estudos recentes (COLLISCHON et al., 2005; LUZ et al., 2005; O'KEEFFE, 2006; AMORIM e CIDREIRA, 2006; PAULO, 2007) afirmam que a saúde do ambiente aquático-terrestre depende da variação sazonal da vazão do rio e não de um nível médio ao longo de todo ano. Neste artigo, essa variação sazonal cujo propósito é a proteção ambiental denomina-se de regime de vazões “ecológicas” que conjuntamente com os múltiplos usos, forneceria ao ecossistema aquático condições de diversidade de *habitat*. Com isso, o regime fluvial passa a ser controlado de acordo com as demandas de uso da água pelo homem, atenuando cheias e secas a fim de tornar o rio e a disponibilidade hídrica “regularizados”. Segundo Pinheiro e Cunha (2010), na Amazônia, tem sido posto como justificativa os aproveitamentos hidrelétricos a fio d'água, ou seja, não são considerados como de regularização. Isto é, o nível d'água permanece “constante”, o que não é uma afirmação discutível e nem sempre verificada.

Para a determinação da “vazão ecológica” tem sido utilizado métodos variados, com classificação em vários grupos. Benetti et al. (2003) subdividiram os grupos de métodos desenvolvidos por diversos autores em seis categorias, acrescentando as que

utilizam regressões múltiplas e métodos informais. Mas todos apresentam limitações quanto a uma conceituação definitiva a este parâmetro.

No presente estudo é desenvolvido uma abordagem sobre o tema a partir do uso de simulação numérica da hidrodinâmica espaço-temporal sazonal para elaborar cenários do atual e futuro escoamento no trecho impactado.

O objetivo da pesquisa é modelar e simular a hidrodinâmica do escoamento superficial do canal e a dispersão de agentes passivos no escoamento (agentes físicos, químicos ou biológicos) no trecho impactado do rio Araguari. O propósito é dispor de subsídios técnicos para analisar os aspectos sazonais da vazão “ecológica” no rio Araguari.

A hipótese da pesquisa é que, segundo as variações espaço-sazonais das vazões, há uma tendência de modificação significativa das características hidrodinâmicas e dispersivas de agentes passivos na água. Estas mudanças influenciam determinantemente a dinâmica de agentes passivos na água, perceptivelmente passando de ambiente lótico para lêntico logo após o enchimento do reservatório. Assim, a quantificação de “perturbações” das características do escoamento pode ser determinante na avaliação da mudança do comportamento da dinâmica ecossistêmica do corpo hídrico.

Neste aspecto, a principal contribuição dessa pesquisa é seu caráter inovador específico envolvendo o acoplamento entre a hidrodinâmica e os processos dispersivos antes e após enchimento de reservatório de hidrelétrica durante períodos críticos do escoamento. Neste aspecto, são considerados principalmente os detalhes físicos dos fenômenos hidrodinâmicos ao longo de um período sazonal anual, especialmente concernente ao que atualmente se conhece como vazão “ecológica” em ambientes com poucos dados disponíveis para análises mais aprofundadas sobre o tema.

### **MATERIAS E MÉTODOS**

O desenvolvimento deste estudo partiu da idéia de que os métodos tradicionais para definição de fluxos ecológicos adotam um valor único que não reflete a realidade natural do sistema aquático. Verifica-se que as vazões que permanecem no leito do rio podem ser superiores à vazão mínima necessária para manter as funções ecológicas do ecossistema aquático em um momento específico do ano, fornecendo a falsa impressão que o ecossistema está preservado (LANNA, 1999 apud AMORIM e LUZ, 2006).

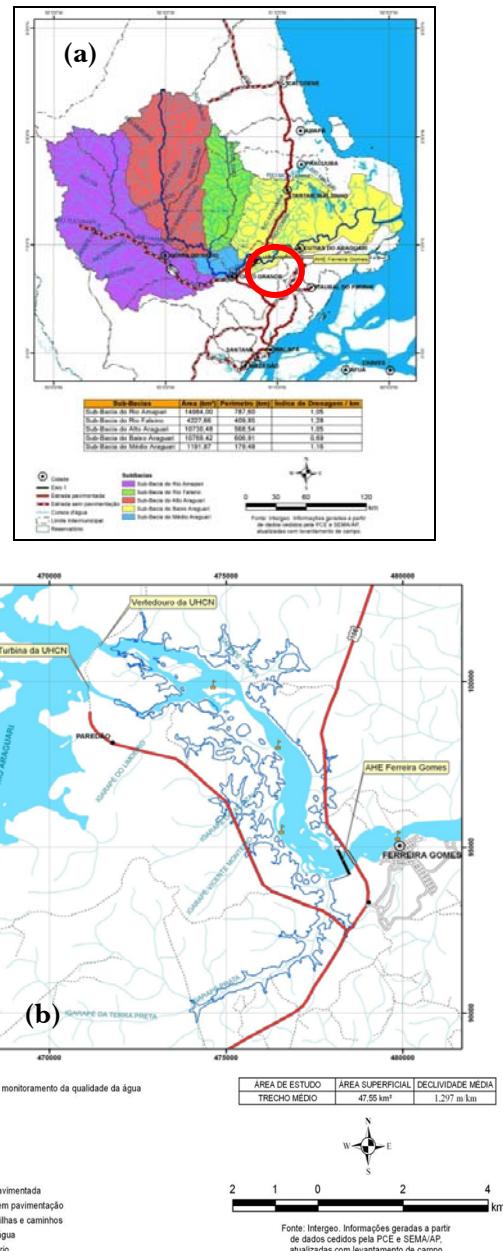
A tendência dos estudos atuais de metodologias para determinação de vazões “ecológicas” é respeitar as particularidades ambientais de cada região do rio baseando-se na mimetização do regime hidrológico natural e devendo manter um fluxo adequado em quantidade, qualidade e sincronismo com os processos bióticos do sistema rio-planície de inundação. Tais conceitos são orientações teóricas para o desenvolvimento de novos cenários de regulação que minimizem impactos sociais e ecológicos na bacia.

No Brasil, a Resolução 37 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH nº 37) estabelece diretrizes para a outorga de recursos hídricos para a implantação de barragens em corpos de água de domínio dos Estados, do Distrito Federal ou da União. Para fins desta resolução é definida uma vazão de restrição, como a vazão que expressa os limites estabelecidos para que haja o atendimento satisfatório aos múltiplos usos dos recursos hídricos e que orienta a operação do reservatório (MACHADO, 2006). No rio Araguari o reservatório da UHE de Coaracy Nunes (UHECN) foi estudado por Bárbara (2006) e Brito (2008) os quais mostraram a necessidade do maior entendimento sobre as interações entre hidrodinâmica e os processos biogeoquímicos daquela barragem.

## Área de Estudo

Na Figura 1 (a) é mostrada a localização do Estado do Amapá e o trecho de estudo. Segundo PROVAM (1990) estes estão localizados no médio rio Araguari, entre as localidades de Ferreira Gomes e Porto Grande. Trata-se de um trecho juvenil, com muitas corredeiras, cujo desnível total é de 54,40 m em 42 km, resultando em um declive médio de 1,297 m/km.

O trecho do AHE Ferreira Gomes I está localizado entre as coordenadas 0° 54.433'N/ 51° 14.277'W (ponto mais a montante) e 0° 51.284'N/ 51° 11.696'W (ponto mais a jusante). Corresponde cerca 7,67 km do Rio Araguari. Como referência de seus extremos se localizam a montante do vertedouro e a turbina da UHE de Coaracy Nunes a jusante da ponte da BR-156. Mais para jusante, encontra-se a cidade de Ferreira Gomes (Figura 1b). Na Figura 1 o sentido do fluxo do rio é da esquerda para a direita. Na parte sudeste da Figura 1 está localizada a cidade de Ferreira Gomes. A partir das linhas azuis claras contornando as margens do canal original é possível perceber a significativa mudança da geometria do canal original.



**Figura 1- a) Estado do Amapá e a bacia hidrográfica do rio Araguari com a área de estudo específico circunscrita em círculo vermelho; (b) futuro reservatório de Ferreira Gomes I a jusante do reservatório contíguo à atual UHECN. Fonte: Ecotumucumaque (2009).**

## Modelo de Turbulência $k-\epsilon$

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995) e Machado (2006), um modelo de turbulência pode ser considerado como um procedimento computacional utilizado para fechar o sistema de equações

que representam o escoamento médio da corrente, segundo o qual uma maior ou menor variedade de problemas genéricos do escoamento pode ser calculada. Para a maioria das propostas de engenharia é desnecessário resolver detalhes das flutuações do escoamento turbulento. Assim, somente os efeitos da turbulência sobre o escoamento médio são usualmente requeridos. Em particular, sempre necessitamos de expressões para as tensões de Reynolds (produto das flutuações turbulentas). Portanto, para um modelo de turbulência ser útil em uma proposta geral, o código deve ter uma ampla variedade de aplicabilidade, além de acurado, simples e econômico em sua execução.

Versteeg e Malalasekera (1995) sugerem ainda que um dos modelos mais úteis na resolução do conjunto de equações que descrevem as equações algébricas a serem resolvidas para o transporte das tensões de Reynolds é o modelo  $k-\varepsilon$ . O modelo padrão  $k-\varepsilon$  apresenta duas equações, uma para  $k$  e outra para  $\varepsilon$  fundamentadas no melhor entendimento dos processos relevantes que causam mudanças dessas variáveis.

A energia cinética turbulenta  $k$  é definida como a variância de flutuação da velocidade. No sistema internacional de medidas sua unidade é  $m^2/s^2$ .  $\varepsilon$  é a dissipação de energia cinética turbulenta (a taxa na qual a energia cinética turbulenta se dissipava no escoamento) e tem dimensões de  $k$  por unidade de tempo,  $m^2/s^3$ .

A equação da continuidade no modelo  $k-\varepsilon$  torna-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

e a do momentum:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) - \nabla \cdot (\mu_{ef} \nabla U) &= \\ = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{ef} \nabla U)^T + B & \end{aligned} \quad (2)$$

onde  $B$  é a soma das forças,  $\mu_{ef}$  é a viscosidade efetiva da turbulência, e  $p'$  é a pressão modificada, definida pela Eq. 3:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_t \bar{\nabla} \cdot U \quad (3)$$

onde  $\mu_t$  é a viscosidade de turbulência. O modelo  $k-\varepsilon$  é baseado no conceito de viscosidade turbinhonar, definida da seguinte forma:

$$\mu_{ef} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

O modelo pressupõe que a viscosidade de turbulência é diretamente proporcional ao quadradado da energia cinética turbulenta e inversamente proporcional à dissipação da turbulência:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$C_\mu$  é uma constante adimensional identificada na Tabela 1.

Os valores  $k$  e  $\varepsilon$  são obtidos por intermédio da equação de transporte da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \dots \\ + \dots P_k - \rho \varepsilon & \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \dots \\ + \dots \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) & \end{aligned} \quad (7)$$

Onde  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  são constantes (Tabela 1).  $P_k$  é a turbulência produzida devido a viscosidade e as forças flutuantes, apresentada na forma abaixo:

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (8)$$

onde  $P_{kb}$  é a turbulência flutuante.

O agente dispersivo é definido pelo próprio usuário e resolvido pelo CFX usando uma equação de transporte (acoplada ao escoamento hidrodinâmico, denominada pela variável genérica de massa  $\phi$ ) (AMORIM e CIDREIRA, 2007).

**Tabela 1 - Constantes para a equação de transporte do modelo  $k-\varepsilon$ .**

Constantes	Valores Adimensionais
$C_{\varepsilon 1}$	1.44
$C_{\varepsilon 2}$	1.92
$C_\mu$	0.09
$\sigma_k$	1.00
$\sigma_\varepsilon$	1.30

Para o transporte de escalar (genérico dissolvido na água) a forma geral da equação de transporte para uma variável adicional (massa ou poluente) é definida pela Eq. 9:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \phi) = \nabla \cdot \left[ \left( \rho D_\phi + \frac{\mu_t}{Sc_\phi} \right) \nabla \phi \right] + S_\phi \quad (9)$$

Onde,  $S_\phi$  é um termo fonte volumétrico, com quantidade conservada por unidade de volume e tempo.  $D_\phi$  é a difusividade cinemática para o escalar e  $Sc$  é o número de Schmidt para a turbulência e  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta.

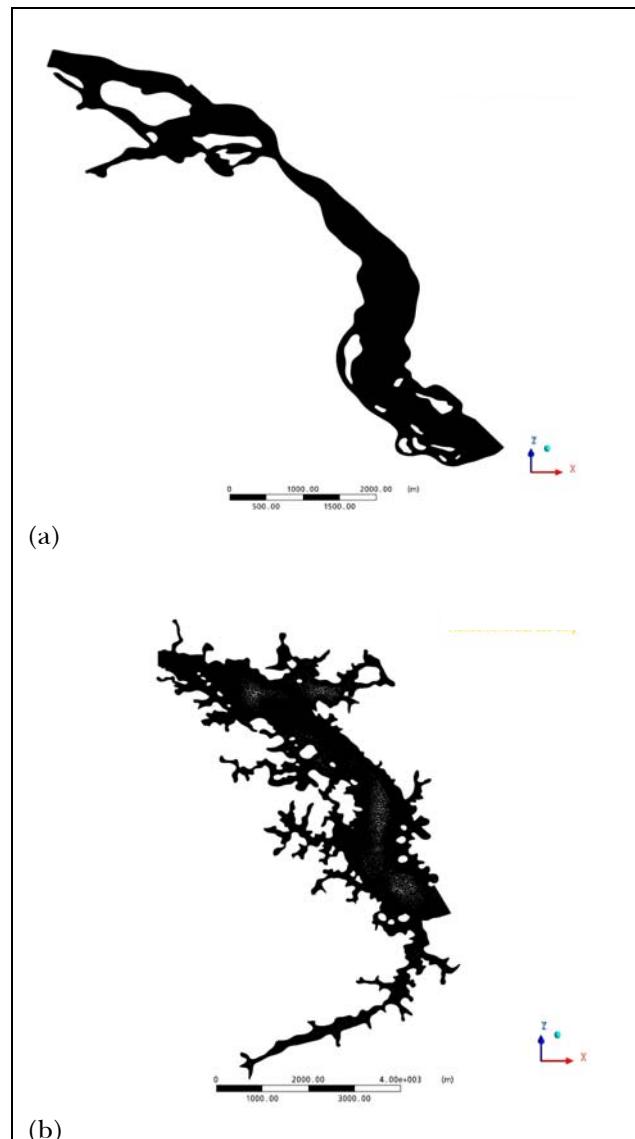
#### Aproximações das Características do Domínio Computacional do Reservatório

Para a representação do trecho estudado, considerou-se um domínio em que o fundo é levemente plano com breves e suaves desniveis de fundo, indicando as variações físicas aproximadas d'água (batimetrias neste reservatório é atualmente inexiste). A profundidade máxima estimada para Ferreira Gomes I foi de 10 m, obtendo-se uma profundidade média de 7,5 m. A secção transversal do rio foi aproximada à forma trapezoidal (PINHEIRO e CUNHA, 2010). O escoamento foi considerado como de características predominantemente bidimensionais, adotando-se uma profundidade pró-mediada variando suavemente ao longo de três trechos de observação utilizados como aproximação para este estudo.

Devido às irregularidades nas bordas do domínio computacional foi necessário um maior refinamento da malha computacional nestas regiões. O domínio antes do alagamento apresentou-se com 230.546 elementos e 81.214 nós (Figura 2a). E o domínio depois do alagamento com 149.171 elementos e 548.714 nós (Figura 2b).

A discretização do domínio foi feita de forma não-estruturada utilizando elementos tetraédricos, devido a versatilidade com a complexa geometria do domínio e facilidade de manuseio deste tipo de malha para adaptabilidade numérica. (FIALHO, 2008).

Em relação aos dados de entrada, foram definidos quatro cenários ou simulações da hidrodinâmica nos trechos de estudo. O primeiro para vazão mínima, o segundo para vazão média, o terceiro para a vazão máxima e o quarto para vazão “ecológica” (Tabela 2).



**Figura 2- Malha computacional de (a) AHE Ferreira Gomes I antes do alagamento; e (b) após o futuro alagamento.**

**Tabela 2 - Dados de vazão nas fronteiras de entrada de fluido do domínio de estudo.**

Domínio	Vazão ( $m^3/s$ )			
	Mínima	Média	Máxima	“Ecológica” **
Ferreira Gomes I	320,49	1206,09	1759,8	73,74

\*\* Vazão ecológica estimada como menos de 1/3 da mínima.

Fonte: Provam (1990), Ecotumucumaque (2009) e Pinheiro e Cunha (2010).

Com os dados das vazões para cada cenário foram definidas as velocidades normais na secção reta da fronteira do volume de controle (potenciais reservatórios), correspondente a entrada de fluido de montante, utilizando a equação 10. As condições de fronteira podem ser vistas na Figura 3.

$$Q = \frac{U}{A} \quad (10)$$

Onde A é a área da interface de fronteira. Observa-se que a fonte contínua de massa é o agente passivo do escoamento indicado por um círculo em vermelho (local da fonte) na Figura 3.

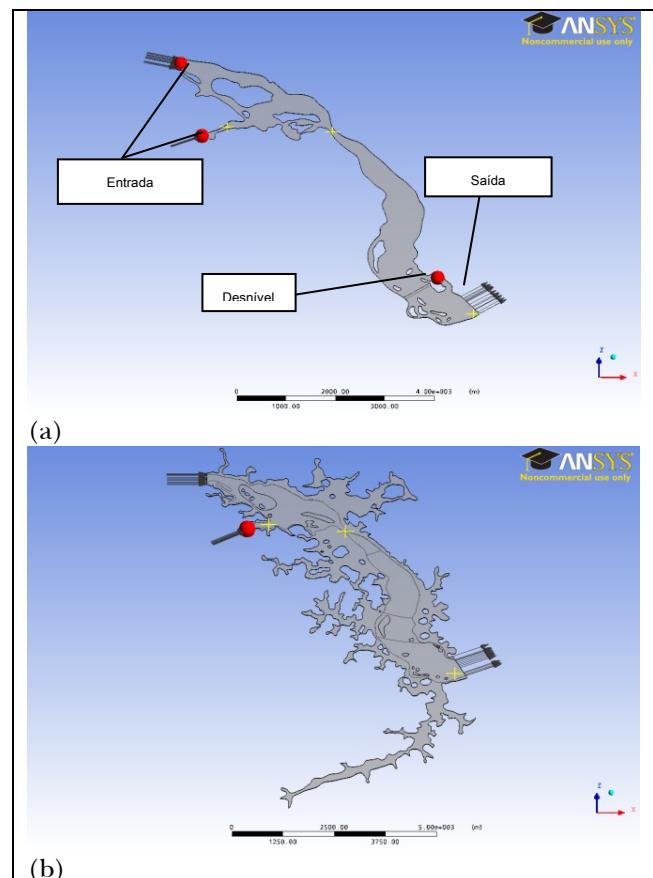
As condições de fronteira (setas pretas) de entrada (*inlet*) e saída (*outlet*) foram definidas no Ansys® CFX-Pré 11.0. As simulações seguiram o regime estacionário de escoamento. A temperatura foi considerada isotérmica a 27 °C (climatológica – CUNHA et al., 2010). Foram escolhidas vazões que caracterizassem cada período sazonal (média de 30 anos), não havendo variação da mesma no tempo (FENTON, 2007; CHOW, 1959).

A fonte de massa, ou taxa de emissão do “agente passivo” foi considerada como sendo constante e similar ao comportamento de um traçador. Exemplos são as plumas de algas (fitoplâncton, zooplâncton, ou poluente). Uma preocupação prática nesta análise seria os *blooms* de algas em reservatório (clorofila *a*). Mas o escalar pode ser representado por plumas de matéria orgânica, combustível, poluição ou lançamento de resíduos, etc.

As taxas de emissão do agente passivo no escoamento e sua localização em cada simulação foram mantidas iguais antes e após o enchimento do reservatório, para efeito de análise comparativa do comportamento das plumas dispersas no canal (atual e após futuro barramento e operação) do AHE Ferreira Gomes I (Tabela 3).

**Tabela 3 - Dados de vazão nas fronteiras de entrada de fluido do domínio de estudo.**

Fontes contínuas de Massa	Taxa de Emissão (kg/s)
Canal de fuga (operação UHECN)	0,002
Vertedouro (operação) (operação UHECN)	0,001
Botafora (construção AHE FG-I)	0,003



● Fonte de massa ou de agentes passivos na água (físico, químico ou biológico). + pontos de monitoramento da concentração de poluentes.

**Figura 3 - Condições de contorno e iniciais: (a) canal atual e (b) após construção da barragem.**

## RESULTADOS

Os resultados são apresentados na seguinte ordem: apresentação campo de velocidade seguida da apresentação do campo de dispersão da respectiva pluma de um agente passivo genérico gerado por três fontes de massa contínuas indicadas por círculos vermelhos da Figura 3 (esquerda acima, vertedouro; esquerda abaixo, turbinas (canal de fuga), direita próximo da saída, “bota fora” (área de construção da barragem AHE FG-I).

Nas análises duas situações foram consideradas, uma antes e outra pós a construção do reservatório (cenários). Os dados de vazão foram obtidos do sistema de monitoramento da Usina Hidrelétrica

de Coaracy Nunes (médias das séries históricas de montante ao AHE FG-I).

As análises numéricas seguintes não contemplam nenhuma tentativa de calibração do modelo em relação ao escoamento ou ao processo dispersivo de agentes passivos, visando tão somente uma análise preliminar holística do problema. Portanto, esta análise deve ser considerada como simplificada, na qual se avaliam os processos físicos decorrentes apenas dos efeitos das vazões sazonais alteradas sobre o sistema aquático a ser impactado.

Apesar das simplificações realizadas na presente análise, entretanto, houve um esforço significativo dos autores para tornar o resultado geral o mais didático possível, com a visualização da variação das perturbações hidrodinâmicas e dispersivas e suas potenciais consequências sobre os processos dispersivos e ecológicos.

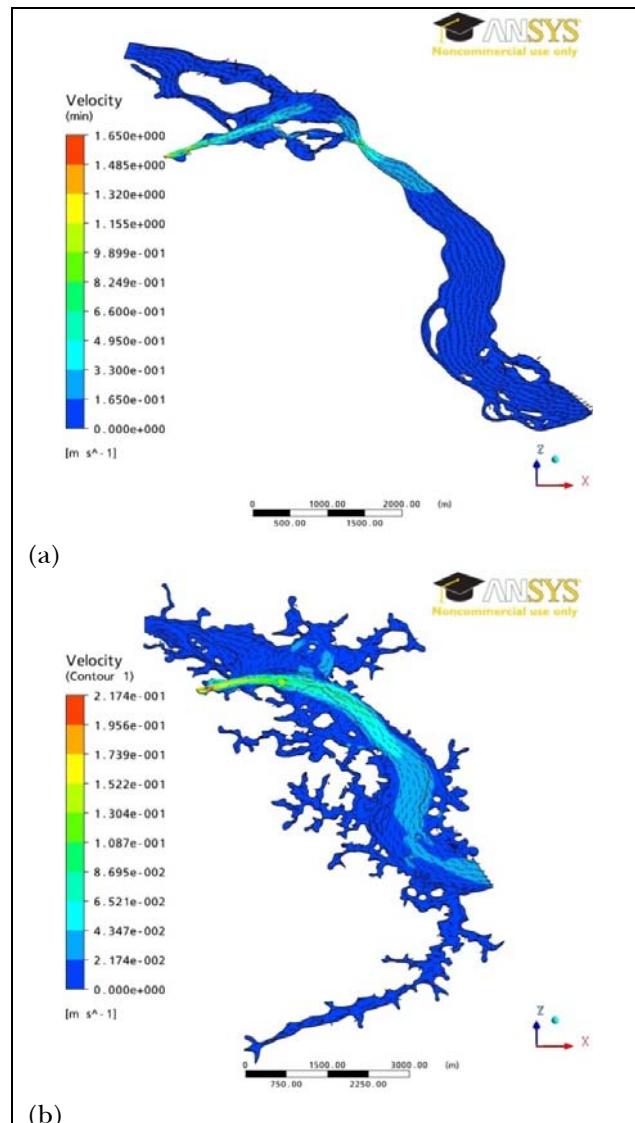
A seguir são indicadas as significativas mudanças do comportamento hidrodinâmico e dispersivos das plumas, considerando que o AHE Ferreira Gomes I irá operar à “fio d’água”, ou seja, com o nível do reservatório “constante”. Neste caso, o comportamento hidráulico do reservatório formado deverá ser semelhante ao aqui analisado sem alterações significativas da nova geometria pós-construção da barragem, apesar da variação sazonal das vazões. É bom observar que em todos os cenários descritos a seguir o escoamento ocorre da esquerda (montante) para a direita (jusante).

### Simulação do Cenário 1: Vazão Mínima

Na Figura 4 observam-se os campos de velocidade cujos valores estão respectivamente entre 0 a 0,8 m/s no trecho original (Figura 4a). Na situação alagada foram encontrados valores entre 0 e 0,1 m/s (Figura 4b). Os maiores gradientes de tensões se localizaram nas regiões de entroncamento, identificadas pelas cores vivas da escala (canal de fuga da UHECN à montante).

Nas figuras 4a e 4b observa-se que na entrada onde se localiza o canal de fuga da UHE de Coaracy Nunes (UHECN) a intensidade da velocidade é maior que no canal do vertedouro, pois no período estudado a vazão no vertedouro é próxima de zero (período de seca). Ainda em relação a vazão mínima, com o novo reservatório, o padrão do escoamento no trecho apresenta mudanças significativas. As regiões próximas das bordas do trecho com o novo barramento são quase todas constituídas por

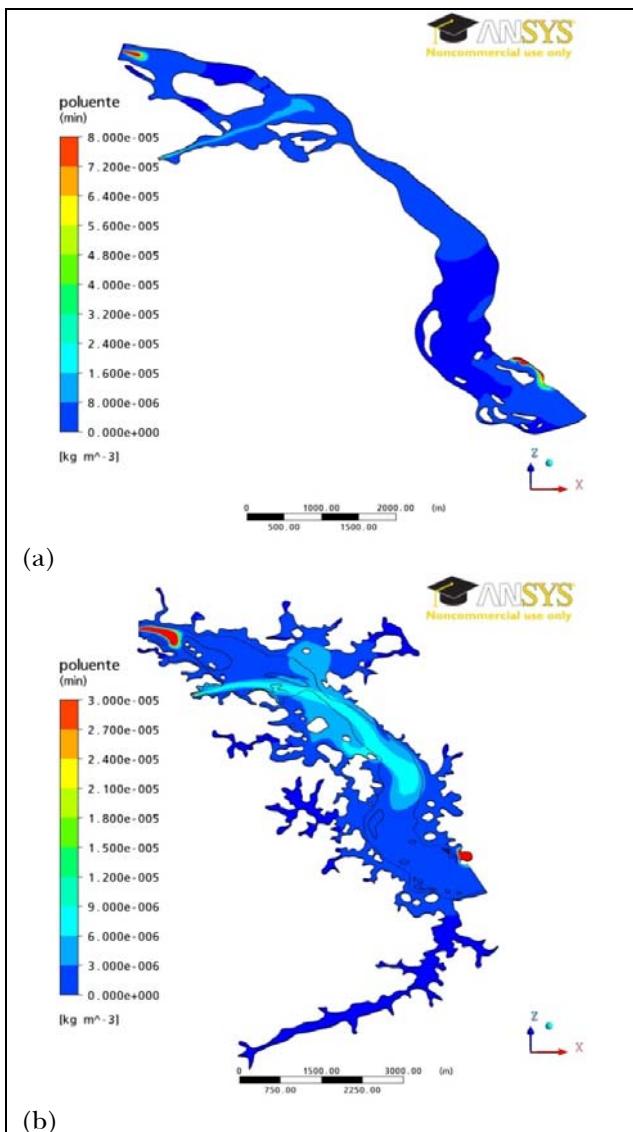
zonas de tendências à recirculação, porém caracterizando escoamentos mais lênticos.



**Figura 4 - Campo de velocidade do escoamento para os domínios: (a) canal atual e (b) após construção da futura barragem.**

Em relação aos processos dispersivos, para o cenário 1 de estiagem (antes e depois do novo reservatório), observa-se que as plumas de poluentes, emitidas pelas 3 fontes da simulação do canal atual (pontos vermelhos da Figura 5a), tendem a estacionar próximas aos mesmos. Isso pode indicar uma tendência ao acúmulo dos agentes passivos nesses locais. Provavelmente em consequência da baixa velocidade de escoamento. A exceção é o ponto

fonte localizado no canal de fuga, que devido a maior velocidade do fluxo turbinado, os poluentes tendem a se dispersar um pouco mais por uma área mais extensa do escoamento.(Figura 5b).

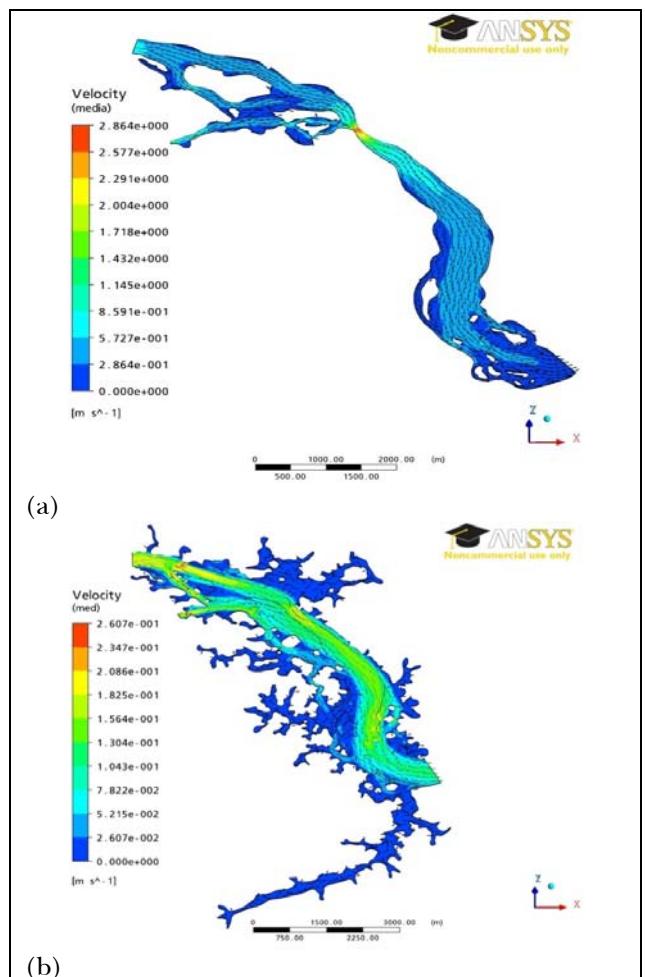


**Figura 5 - Dispersão das plumas poluentes ao longo dos dois trechos. (a) canal atual e (b) após construção da futura barragem.**

É importante observar que, com a geometria modificada do novo reservatório, surgem zonas lênticas com baixas velocidades, justamente próximas das zonas dendríticas laterais do novo reservatório e ausentes no canal original. Do ponto de vista ecológico, é nessas zonas que podem surgir problemas ecológicos, como focos de vetores transmissores de doenças e significativas alterações nas interações

entre rio e solo, os quais surgem como um dos principais problemas ecológicos já considerados na introdução do presente artigo.

Na Figura 5b os poluentes concentram-se nos mesmos pontos onde a velocidade do escoamento é baixa. Mas a pluma originada pela fonte pontual do canal de fuga atinge uma área maior do domínio, quando comparada à Figura 5a, porém com níveis de concentração menores que no cenário antes do barramento.

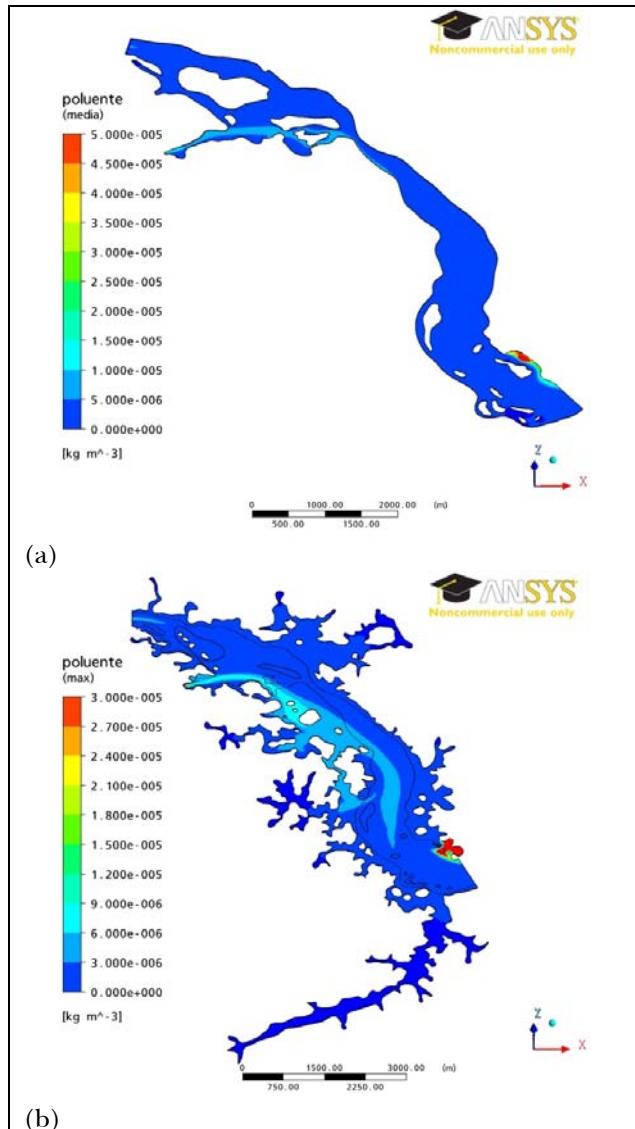


**Figura 6 - Campo vetorial da velocidade pra uma vazão média anual nos domínios: (a) canal atual e (b) após construção da futura barragem.**

### Simulação Cenário 2: Vazão Média

As máximas velocidades médias encontradas no reservatório de Ferreira Gomes I, na anterior (Figura 6a) à construção da barragem, foram da ordem de até 2,8 m/s, normalmente localizadas nos

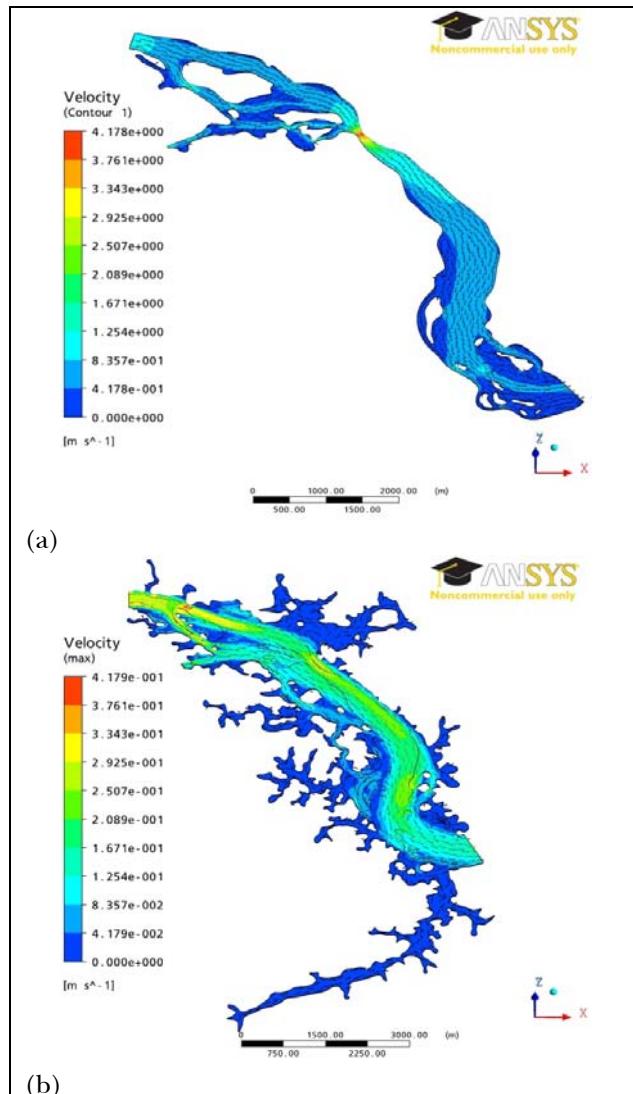
estreitamentos e regiões contraídas próximas às margens do canal rochoso. Na Figura 6b a velocidade máxima média encontrada foi de 0,26 m/s, cujo escoamento torna-se mais lento com o futuro reservatório. Observa-se que nos dois casos o fluxo oriundo do vertedouro da UHE Coaracy Nunes tem influência mais efetiva no escoamento, alterando toda a dinâmica do escoamento.



**Figura 7. Plumas de poluentes e dispersão na vazão média: (a) canal atual e (b) após construção da futura barragem.**

Na Figura 7 nota-se que a velocidade do escoamento aumenta por todo o domínio, quando comparada com a análise anterior da vazão mínima.

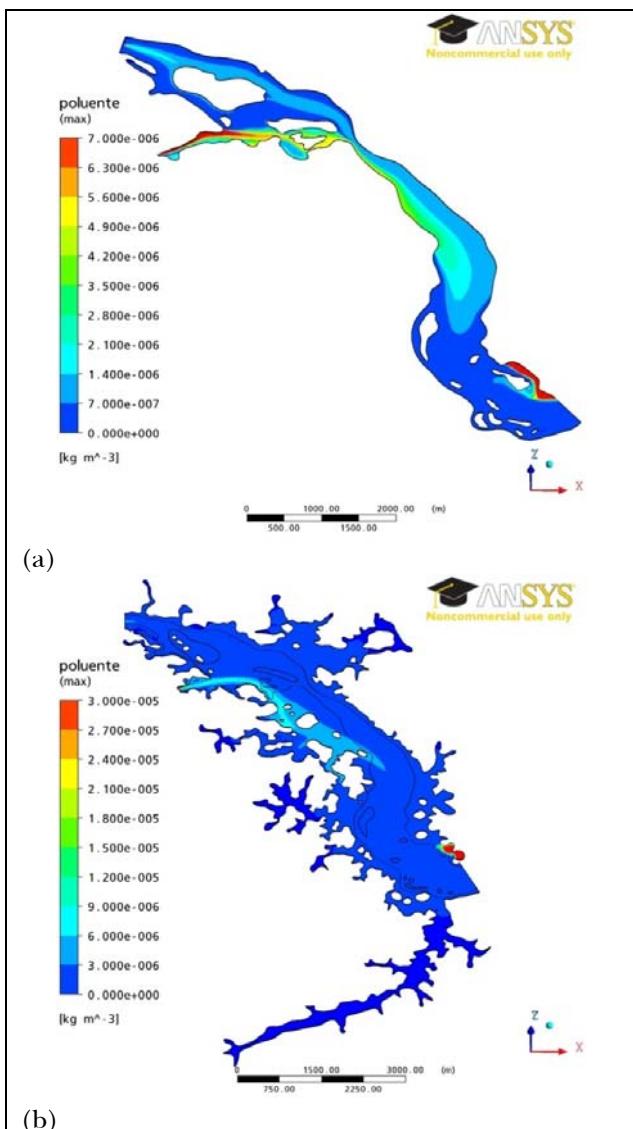
Em ambos os domínios, anterior e posterior ao alargamento, o fluxo do vertedouro soma-se com o proveniente do canal da turbina. A velocidade 0,2 m/s é predominante por uma grande área do canal na situação de formação do reservatório.



**Figura 8 - Campos de velocidades para vazão máxima: (a) canal atual e (b) após construção da futura barragem.**

Em termos dispersivos observa-se que o aumento da vazão provoca maior espalhamento das plumas. No caso do canal original o ponto denominado “bota-fora” (próximo da saída) ainda representa certo risco, pois os poluentes tendem a se manter estacionados nesta região (Figura 7a). No cenário posterior (Figura 7b) as plumas se dispersam por um trecho maior, mas com uma concentra-

ção menor que a da simulação anterior ao alagamento. Observa-se também que o formato das plumas tornaram-se significativamente diferentes.



**Figura 9 - Dispersion de plumas de poluentes com a vazão máxima: (a) canal atual e (b) após construção da futura barragem.**

#### Simulação do Cenário 3: Vazão Máxima

Neste caso, devido ao súbito estreitamento do rio, logo após a junção das duas entradas provenientes da UHECN, estimou-se uma superelevação da velocidade neste trecho. A velocidade máxima encontrada antes do alagamento foi da ordem de 4m/s. Este valor da velocidade pode ter sido provo-

cada também pela subestimação da profundidade naquele referido ponto, haja vista que a profundidade foi mediada ou aproximada em três partes do domínio computacional, com tendência a maiores erros neste trecho específico (Figura 8a).

Quando a profundidade se eleva o nível da do fluxo da secção transversal logo a jusante, quando a velocidade do escoamento decai em média para aproximadamente 0,4 m/s, visto que somente a área varia, mas não a vazão (Figura 8b).

Em relação às plumas de poluentes (Figura 9), no cenário 3, também se observa o aumento da velocidade em todo o domínio, cuja consequência principal é o aumento da turbulência e da dispersão. Porém, um efeito contrário da diluição ocorre. Na simulação anterior ao alagamento os poluentes ocupam grande parte do trecho, mas sua concentração é de uma ordem menor do que nos outros cenários.

Na simulação com novo reservatório observa-se a localização dos mesmos pontos críticos do escoamento. Apesar do aumento da dispersão neste caso, por outro lado, também há o efeito significativo de diluição das plumas, como pode ser observado pela ordem de grandeza das concentrações do poluente (Figuras 9 a e b).

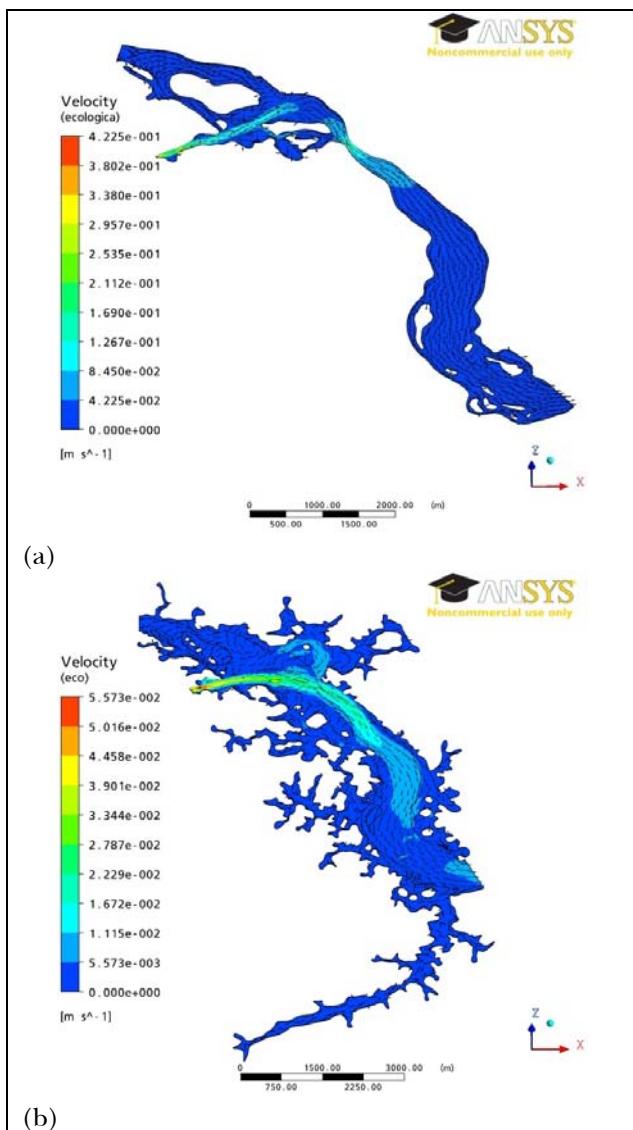
#### Simulação do Cenário 4: Vazão “Ecológica”.

A vazão ecológica ou potencial de vazão ambiental é uma vazão difícil de definir, haja vista que depende de vários fatores socioambientais além dos puramente hidrológicos. Mas no presente estudo adotou-se um valor padrão da ordem de 1/3 da vazão mínima para atender aos “mínimos” requisitos de funcionalidade estimados para os ecossistemas aquáticos do AHE, sendo comprehensivelmente passível de questionamentos. (Tabela 2).

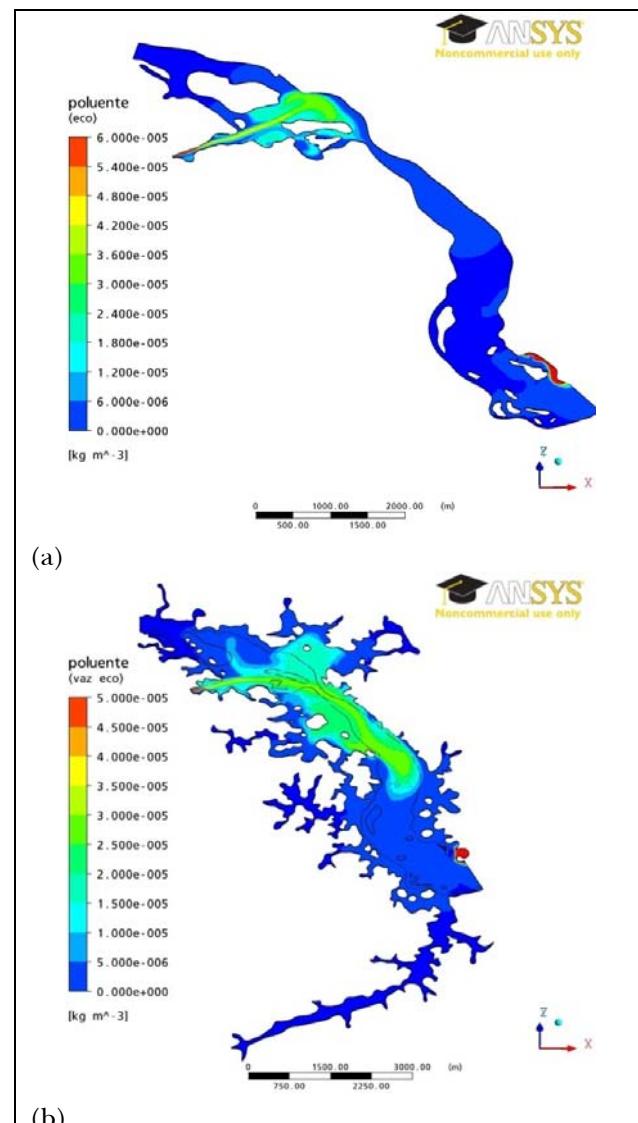
O valor da velocidade máxima “ecológica” encontrado no domínio foi da ordem de 0,4 m/s (Figura 10a). Na situação de reservatório os valores variaram entre próximos de zero a valores mínimos da ordem de 0,052 m/s. O padrão do escoamento não se modificou significativamente em relação à vazão mínima. Isto é, o comportamento hidrodinâmico do canal passou a ser dependente somente do fluxo advindo da entrada do canal de fuga da UHECN (Figura 10 a e b).

Uma consequência relacionada aos menores valores de velocidade nas regiões de recirculação é a menor capacidade de dispersar ou diluir a pluma de poluente no canal, o que também ocasiona uma maior concentração do agente passivo na zona de jusante da fonte. Na figura 11 evidencia-se a disper-

são de plumas para a vazão “ecológica”. As velocidades “ecológicas” máximas também foram encontradas nas mesmas regiões das simulações mínimas, porém com maior intensidade e menos dispersas. Como ocorre na vazão mínima, uma observação importante é que a pluma somente se dispersa pelo canal de fuga, pois nestas condições críticas de operação o vertedouro está completamente fechado, para que se otimize e garanta operação e máxima geração de energia gerada a montante pela UHECN (Figura 11a e b).



**Figura 10 - Campo vetorial da velocidade referente à vazão ecológica estimada: (a) canal atual e (b) após construção da barragem.**



**Figura 11 - Campo de dispersão de poluentes para vazão ecológica: (a) canal atual e (b) após construção da futura barragem.**

No trecho do canal natural a pluma oriunda do ponto fonte localizada no canal da turbina é lançado até o canal principal e concentrando-se nesta região. A fonte localizada a jusante do local denominado de “bota fora” está acima do valor de 0.00006 kg/m<sup>3</sup>. Na vazão “ecológica” os impactos das plumas tendem a ser potencialmente maiores que em vazões superiores, dificultando a dispersão nesse trecho do rio.

O campo de velocidade da Figura 11b indica que as correntes não serão capazes de diluir facilmente as plumas advindos das respectivas fontes de emissões, o que poderá indicar uma tendência a

ocasionar acúmulo de poluentes ou possíveis danos locais ao ecossistema, especialmente com uma tendência potencial à eutrofização do reservatório.

## CONCLUSÕES

Foram aplicadas técnicas de modelagem e simulação numéricas para representar a hidrodinâmica e a dispersão de agentes passivos na água (simulando agentes físicos, químicos ou biológicos) representados por plumas em um trecho do rio Araguari-AP. O domínio computacional representou o local da construção de barragem e formação de futuro reservatório de aproveitamento hidrelétrico (AHE) em Ferreira Gomes I no Estado do Amapá.

Dois aspectos da análise se destacaram no presente trabalho: a complexidade natural do escoamento em decorrência da geometria do rio e o acoplamento de um escalar à hidrodinâmica do escoamento (fonte contínua de massa), fatores fundamentais nos estudos integrados dos processos ambientais como os hidrológicos, o transporte de massa e os ciclos biogeoquímicos.

A seguir são descritas as principais conclusões:

1. Na ótica do escoamento controlado tanto pela UHECN (à montante) quanto pela variabilidade hidrológica sazonal natural, as simulações descreveram com certo realismo o desenvolvimento crítico do escoamento natural e alterado bem como seus respectivos fenômenos dispersivos (plumas de agentes passivos) na água em ambiente aquático amazônico e sob impacto ambiental. Sua importância está na necessidade de entender as escalas espaço-temporais das variáveis de interesse do sistema dispersivo. Especial atenção são a estimativa da taxa com a qual os processos fisiológicos e comportamentais podem ocorrer na água, tais como o consumo de nutrientes pelo fitoplâncton ou a herbivoraria do zooplâncton, principalmente nas fases sazonais críticas denominadas de vazões “ecológicas”. Esta última foi considerada crítica para o ecossistema aquático frente às necessidades operacionais do futuro AHE Ferreira Gomes I.
2. Neste estudo, a modelagem e a simulação realizadas surgem como mais uma técnica de abordagem ou ponto de partida para análises futuras mais aprofundadas sobre o

escoamento turbulento em um trecho alterado pelo reservatório no rio Araguari. Na literatura, utilizada como base de discussão, foi enfatizado que, a partir das análises dos campos de velocidade e de dispersão de massa que, de fato, a corrente (hidrodinâmica) pode afetar a distribuição de espécies de organismos aquáticos que habitam diferentes zonas do escoamento, bem como interferir no transporte de nutrientes e na remoção de dejetos. Ademais, como observado nas simulações, observa-se uma tendência de que a vazão “ecológica” é variável durante o ano todo, aproximando-se inclusive do regime hidrológico natural, que é particular para cada rio – conhecida como “paradigma das vazões naturais”. Com efeito, o regime hidrológico fluvial deveria ser caracterizado pela ampla variabilidade dos fluxos de acordo com suas flutuações sazonais (longitudinal, vertical e lateral). Estes são considerados elementos básicos de modo que a ecologia dos ecossistemas aquáticos forneça mais subsídios às soluções de problemas ambientais causadas por impactos de reservatórios de hidrelétricas.

3. Nos quatro cenários estudados observou-se que a hidrodinâmica e a dispersão de poluentes no futuro reservatório de Ferreira Gomes I sofre significativa influência da vazão de saída do vertedouro e da casa de força devido a operação da UHECN (canal de fuga da turbina). Este fato indica que a operação da UHE Coaracy Nunes influenciará tanto a hidrodinâmica quanto a dispersão de agentes passivos na água. Com efeito, deverá afetar o equilíbrio ecológico aquático de jusante em FG-I (por exemplo, distribuição e riqueza de espécies de fitoplâncton). Quando comparados os cenários de dispersão de plumas, verificou-se que a sazonalidade hidrológica influencia significativamente o comportamento das mesmas, quando se considera a operação de montante da UHE Coaracy Nunes. Esse fato tende a ocorrer principalmente nas vazões mínimas e “ecológicas” em FG-I porque o vertedouro da UHECN tende a permanecer totalmente fechado. Nestas condições as plumas se concentram mais proximamente das fontes de emissão, tendendo a se dispersar menos devido ao menor poder de diluição do escoamento causadas pelas baixas vazões, e ocorrendo o inverso nas vazões médias e

máximas. Como visto na revisão da literatura, do ponto de vista do **substrato**, como o leito dos rios, a hidrodinâmica pode ser importante no controle da desova de muitas espécies que os utilizam para proteger seus ovos da correnteza e dos predadores, influenciando a disponibilidade de substratos adequados e a distribuição e abundância de peixes. Do ponto de vista da **temperatura**, que afeta o metabolismo dos organismos, a disponibilidade de alimentos, seu consumo e consequentemente exposição a predadores também podem ser influenciados pela hidrodinâmica. O **oxigênio dissolvido** (OD) e **consumido** (DBO) são considerados fatores limitantes da vida nos ecossistemas aquáticos, principalmente na fase do enchimento do reservatório, dependendo principalmente das correntes, tendo um papel fundamental na renovação da água e na provisão do necessário gradiente na concentração de OD requerido para a sobrevivência dos peixes. Destaque ao fato de que vários organismos não conseguem satisfazer suas necessidades de oxigênio em vazões baixas e altas temperaturas, por exemplo.

4. Uma relevante contribuição deste estudo talvez seja mostrar que as mudanças do escoamento poderão interferir potencialmente em vários fatores abióticos e bióticos do sistema aquático, como a corrente (a vazão ecológica seria o caso mais crítico, mas não o único), no substrato, na temperatura e no OD (ou DBO), os quais são responsáveis pelo equilíbrio do ecossistema aquático em níveis aceitáveis.
5. Esta análise também aponta para o fato de que não é possível considerar apenas um valor de vazão “ecológica” (normalmente imposta por decretos ou leis sem fundamentação científica aprofundada). Estes dispositivos são comumente utilizados em projetos ou estudos de impactos ambientais e até exigidos para construção de hidrelétricas, tornando-se um ponto de confirmação e até relativa convergência de diretrizes quanto a sua aplicação legal.
6. No presente estudo de caso do AHE Ferreira Gomes I, os cenários simulados podem ser úteis para uma reflexão sobre o planejamento e monitoramento da qualidade da água e microbiológica, podendo auxiliar o gerenciamento da área diretamente afetada pelo reservatório. Isso porque a escala spa-

ço-temporal de vários processos normalmente difere da escala monitorada e, consequentemente, os fatores físicos governantes tendem a ter sua relevância mais evidenciada ao se empreender decisões técnicas fundamentadas em características conhecidas do escoamento. Um dos exemplos mais interessantes são as interações tróficas dos ecossistemas aquáticos que dependem de variáveis como o número de *links* da cadeia alimentar, ou a força e a posição da perturbação imposta ao ambiente aquático, discutidas anteriormente. No presente caso, esta força imposta seria a variação sazonal da vazão, cuja fase crítica seria representada pelas vazões mínima e “ecológica”. Portanto, uma especial atenção deve ser dada para os reservatórios de regiões pouco estudadas ou carentes de todo tipo de informação, como os novos empreendimentos hidrelétricos na Amazônia, com destaque as do Estado do Amapá. Normalmente as bacias da região são pouco estudadas e carentes de estudos hidrológicos ou hidrodinâmicos específicos.

7. Finalmente, a vazão desempenha um papel fundamental na ecologia dos ecossistemas lóticos, constituindo-se em fator determinante na estrutura e diversidade das comunidades bióticas porque efetivamente influenciam as características abióticas do escoamento, principalmente as dispersivas. A modificação do regime hidrológico provoca a alteração da velocidade e profundidade do escoamento, além do regime de transporte de sólidos e a morfologia do leito. Com efeito, também tendem a afetar diretamente a temperatura e a qualidade da água de modo geral. Portanto, a vazão “ecológica” deve ser considerada em **todo o ciclo hidrológico e não apenas durante uma única etapa crítica do ciclo hidrológico**. Isto porque a “vazão ecológica” é especialmente definida na fase de estiagem ou mínima, quando vários problemas ambientais parecem ser mais evidentes. Contudo, os problemas ambientais não ocorrem somente durante o período de estiagem. Como foi observado nos cenários simulados, é de suma importância considerar holisticamente todos os demais períodos do ciclo hidrológico. A razão disso é que para cada período podem ocorrer situações críticas inerentes ao estado atual do ecossistema aquático, justamente devido às interações específicas dos

mesmos, as quais são influenciadas pelas forçantes hidrológicas de cada período sazonal.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a concessão de bolsa Produtividade-PQ do CNPq, processo 305657/2009-7; e apoio aos Projetos REMAM 2/FINEP/CNPq e SUDAM/IEPA.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, J. R. L. *Physical processes of sedimentation*. George Londres: Allen & Unwin Ltd., 1970.
- AMORIM, F. B. e LUZ, L. D. *Regime de vazões ecológicas: garantia da biodiversidade fluvial*. 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). 2006. 11p.
- AMORIM, F. B.; CIDREIRA, T. S. *Alocação de águas em bacias hidrográficas: uma abordagem ambiental*, 2006. 62f. Monografia (Especialização), Departamento de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2006.
- ANSYS User's Manual for Rev. 11 - ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2007.
- BARON, J. S. et. al. *Ecosistemas de Agua Dulce Sustentables. Tópicos en Ecología*. Número 10 Invierno, 2003.
- BENETTI, A. D. et al. Metodologias para Determinação de Vazões Ecológicas em Rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*. v. 8, n. 2, 2003.
- BRITO, D. C.. *Aplicação do sistema de modelagem da Qualidade da Água qual2kw em Grandes Rios: O Caso da Alto e Médio rio Araguari - AP*. 2008. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical (PPGBIO)). Universidade Federal do Amapá. 2008.
- BÁRBARA, V. F.. *Uso do Modelo QUAL2E no Estudo da Qualidade da Água e da Capacidade de Autodepuração do Rio Araguari – AP (Amazônia)*. 2006. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.
- Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução Nº 357 de 17 de março de 2005. Disponível em <[www.mma.gov.br/conama/res/res05/res35705.pdf](http://www.mma.gov.br/conama/res/res05/res35705.pdf)>. Acesso em 15 de Março de 2009.
- CHOW, V.T., *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company. 1959.
- CUNHA, A.C. *Pollutants Movement in the environment: the shallow flow experimentation and numerical simulation on Matapi River Mouth, in Amapá/ Brasil, estuarine coast*. 2008. 105f. Post doctorate engineering. American World University Missipi/ CA. EUA, 2008.
- CUNHA, A.C; BRITO, D. C.; PINHEIRO, L. A. R. Análise de cenário da qualidade da água no rio Araguari (AP) com o uso do sistema de modelagem Qual2kw: Impactos de Hidrelétricas e Urbanização. In: *Tempo, Clima e Recursos Hídricos: resultados do Projeto Remetap no Estado do Amapá*. Ed. Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – NHMET/IEPA. Macapá, ap. Capítulo 8, p. 135-154. 2010.
- CUNHA, E. D. S. *Levantamento florístico, dinâmica espaço-temporal e quantificação da biomassa do fitoplâncton dos rios Araguari e Falsino (Amapá/Brasil)*. 2012. 70f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) - Universidade Federal do Amapá, PPGBI-O/UNIFAP. 2012.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia fluvial*. Edgard Blucher, Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, 1981.
- COLLISCHONN, W. et al. *Em busca do hidrograma ecológico*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.
- FIALHO, A. B. *SolidWorks Office Premium 2008: Teoria e Prática no Desenvolvimento de Produtos Industriais: plataforma para projetos CAD/CAE/CAM/* Arivelto Bustamante Fialho. São Paulo: Érica. 2008.
- FENTON, J. *Open channel hydraulics*. Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe Kaiserstrasse 12, 76131 Karlsruhe, Germany. 2007.
- FRAGOSO JÚNIOR, C. R. *Simulações da Dinâmica de Fitoplâncton no Sistema Hidrológico do Taim (RS)*. Dissertação (Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas) – UFRGS, 2004.

FRAGOSO JÚNIOR, C. R., et al. *Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos*. Oficina de Textos. São Paulo. 2009. 304 p.

HENRY, R. (Org). Os ecótonos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos: conceitos, tipos, processos e importância. Estudo de aplicação em lagoas marginais ao rio Paranapanema na zona de sua desembocadura na represa Jurumirim. In: *Ecótonos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos*. São Carlos: RiMa. 2003, 349p.

JUNK, W. J. et al. *The flood pulse concept in river-floodplain system*. Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences/Publication spéciale canadienne des sciences halieutiques et aquatiques, 1989.

LANNA, A. Eduardo. Instrumentos de Gestão das Águas: Outorgas. In: *Gestão das Águas*, Capítulo 5. 1999.

MACHADO, M. B. *Modelagem Tridimensional da Dispersão de Poluentes em Rios*. 2006. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas – SP, 2006.

O'KEEFFE, J. *What are environmental flows? background and rationale*. Delft, The Netherlands. Disponível em: <ftp://ftp.ihe.nl/Jay/>. Acessado em 17 mai. 2006.

OLIVEIRA, P. S. G. de. *Estudo das várzeas visando o controle de cheias urbanas e a restauração ecológica: o caso do parque linear do Ribeirão das Pedras, em Campinas, SP*. 2004. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2004.

PAULO, R. G. F. *Ferramentas para a determinação de vazões ecológicas em trechos de vazão reduzida: destaque para aplicação do método do perímetro molhado do caso de Capim Branco I*. 2007. 96f. Dissertação (Mestrado da UFMG. Curso de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). UFMG, 2007.

PEDRALLI, G.; TEIXEIRA, M. do C. B.. Macrófitas aquáticas como agentes filtradores de materiais particulados, sedimentos e nutrientes. In: *Ecótonos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos*. HENRY, Raoul (Org). São Carlos: RiMa., 2003. 349p

PINHEIRO, L. A. R.e CUNHA, A. C. Modelagem e Simulação da Hidrodinâmica Superficial e Dispersão de Poluentes no Rio Araguari (AP) Aplicados a Es-

tudos Ambientais de Aproveitamento Hidrelétrico (AHE). In: *Tempo, Clima e Recursos Hídricos: Resultados do Projeto REMETAP-AP*. Capítulo 9. IEPA, Macapá-AP, p. 155-176, 2010.

PROVAM. *Programa de Estudos e Pesquisas nos Vales Amazônicos*. Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia. Belém, PA: SUDAM/OEA. v. 1. 1990. 189 p..

SOBRINHO, G. A. *Aplicação de equações de resistência ao escoamento em um trecho do rio Atibaia/SP*. 1996. Dissertação (Mestrado. Universidade Estadual de Campinas), Campinas-SP, 1996.

STANFORD, J. A.; WARD, J.V. Revisiting the Serial Discontinuity Concept. *Regul. Rivers: Res. Manage*, v. 17, p. 303–310, 2001.

STATZNER, B.; HIGLER, B. Questions and comments on the River Continuum Concept. *Canadian Journal of fisheries and aquatic science*, v. 42, p. 1038-1044, 1985.

THOMAZ, S. M. et al. Decomposição das macrófitas aquáticas e sua relação com o pulso de inundação. In: *Ecótonos nas interfaces dos ecossistemas aquáticos*. HENRY, Raoul (Org). São Carlos: RiMa. 2003, 349p

VANNOTE, R.L. et al. The river continuum concept. *Canadian Journal of fisheries and aquatic science*, v. 37, n.1, p.130-137, 1980.

WARD, J. V.; STANFORD, J. A. The serial discontinuity concept in lotic ecosystems. In: FONTAINE, T. D. & BARTHEL, S. M., EDS. *Dynamic of lotic ecosystems*. Ann. Arbor. Scien. Michigan, p. 347-356, 1983.

VERSTEEG, K. H.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Prentice-Hall. 1995, 297 p.

WARD, J. V.; STANFORD, J. A. The serial discontinuity concept: extending the model to floodplain rivers. *Regul. Rivers: Res. Manage*, v.10, p. 159–168, 1995.

WARD, J.V., ROBINSON, C.R.; TOCKNER, K. Applicability of ecological theory to riverine ecosystems. *Verh. International Verein. Limnol*, v. 28, p. 443-450, 2002.

**Modeling And Simulation Of Seasonal Flow And Dispersion Of Passive Agents In Araguari River, AP. Scenarios For The Ferreira Gomes-I - Hydroelectric Development (AHE) , Amapá/Brasil**

**ABSTRACT**

The research seeks to model and simulate the hydrodynamic and dispersion phenomena in water applied to environmental impact assessment (EIA) for the construction of the Ferreira Gomes I hydroelectric plant (AHE), located in the middle Araguari river - Amapá, Brazil. The general objective is to analyze the changes in river flow behavior as an abiotic factor in deciding the new balance of the aquatic ecosystem of the future reservoir. Besides flow, the physical processes that involve the dispersion of passive agents in water are analyzed. They are specifically represented by continuous inert loads prior to and after construction of the reservoir. The methodology involved the use of an CFX 11.0 computer system to model and simulate the turbulent flow numerically. The turbulence model used was the standard model  $k-\varepsilon$ . 3D computational meshes were generated to represent the geometry of the water system before and after construction of the reservoir. Environmental scenarios were used in four different steady seasonal streamflows: maximum, average, minimum and "ecologic." The results indicated a significant change in both the geometric characteristics of the natural channel and in the hydrodynamic behavior of the pollution plumes in water. It was found that the seasonal hydrologic drought may be most critical to "control" the amount of flow at Ferreira Gomes I AHE, especially as a consequence of the Coaracy Nunes (UHCN) hydroelectric plant operation. In conclusion it was observed that the environmental scenarios show the importance of studying the hydrodynamic flow regime, especially the minimal and "ecologic" flows, because the dispersion processes of the passive agents in water are critical and strongly linked with the maintenance of ecological and biogeochemical cycles (renewal rate, reaeration, flow regime: lotic or lentic). The results indicate the usefulness of applying objective methods to represent the complex flow when considering the abiotic forcings on the aquatic ecosystem of the reservoir flooding and multiple use of water.

**Key-words:** hydrodynamic, pollution dispersion, seasonal, simulation, ecologic flow; hydropower, Amapá.