

## APÊNDICE 10.2

### Modelagem Matemática e Ecológica do AHE Belo Monte

## 1 Introdução e considerações gerais

### 1.1 A utilização de modelos matemáticos e ecológicos para o gerenciamento de reservatórios

A utilização de modelos matemáticos para o gerenciamento de reservatórios vem sendo aplicada intensivamente nos últimos cinco anos. Uma revisão da utilidade dos modelos para obter gerenciamento otimizado dos ecossistemas aquáticos artificiais foi feita por Tundisi & Straskraba (1999) e mais recentemente por Jorgensen et al (2005).

A aplicação de modelagem matemática e ecológica para analisar futuros cenários da qualidade da água em reservatórios, combinando o modelo MQUAL de fontes não pontuais com o Índice de Estado Trófico e as simulações de respostas em reservatórios foi realizada pelo IIEGA em 2005 para 48 represas do Rio São Francisco (IIEGA-2005-relatório).

No caso específico dos modelos e sua aplicação para os reservatórios, ou melhor, o AHE Belo Monte, a principal função de força é o volume de água do reservatório e o tempo de retenção e a resposta é a qualidade da água dos reservatórios e a qualidade e quantidade da água a jusante. Estes modelos deverão ser calibrados com o funcionamento do sistema e as determinações concomitantes a este funcionamento. As funções de controle são o tempo de retenção dos reservatórios.

O estudo de sistemas complexos com aplicações na área de engenharia implica em uma cooperação estreita entre limnólogos e engenheiros. Métodos de análises de sistemas possibilitam que os limnólogos utilizem dados acumulados em séries históricas para esclarecer tendências gerais, desenvolver comparações quantitativas e interpretar complexas interações entre componentes dos sistemas. Reservatórios e suas bacias hidrográficas são sistemas complexos e dinâmicos com permanentes interações que resultam em processos. Este capítulo pode ser objeto de estudos e programas de modelagem, o que permite desenvolver cenários e apresentar hipóteses e perspectivas. De um modo geral, o reservatório e sua bacia hidrográfica podem ser expressos da seguinte forma representativa:

<b>Características da bacia hidrográfica:</b>	<b>Características do rio:</b>	<b>Características do reservatório:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Latitude, longitude.</li> <li>• Geologia.</li> <li>• Geomorfologia.</li> <li>• Climatologia.</li> <li>• Precipitação.</li> <li>• Vazão.</li> <li>• Drenagem.</li> <li>• Usos da bacia hidrográfica.</li> <li>• Cobertura vegetal.</li> <li>• Sócio-economia regional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descarga (m<sup>3</sup>/s).</li> <li>• Composição química da água.</li> <li>• Características morfométricas do rio e do leito do rio.</li> <li>• Biota aquática.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidade total.</li> <li>• Profundidade média.</li> <li>• Tempo de retenção.</li> <li>• Estrutura térmica.</li> <li>• Composição química da água.</li> <li>• Biota aquática.</li> </ul>
<b>Subsistema 1</b>	<b>Subsistema 2</b>	<b>Subsistema 3</b>

Para entender como funcionam os 3 subsistemas que são integrados entre si no espaço e no tempo e, portanto, são sistemas dinâmicos, é necessário compreender as flutuações dinâmicas e as interações entre esses subsistemas. É difícil e complexo estabelecer relações diretas causa-efeito devido ao conjunto de processos cumulativos envolvidos – por exemplo, reprodução das populações, dinâmica das populações e sucessão de espécies no espaço e no tempo. Entretanto, a organização de modelos que possam integrar os componentes e simular respostas e futuros comportamentos é fundamental para o gerenciamento. Além disto, é necessário estudar cada compartimento e compartimentalizar as subunidades de tal forma a obter para cada compartimento uma resposta mais precisa e de maior valor aplicado.

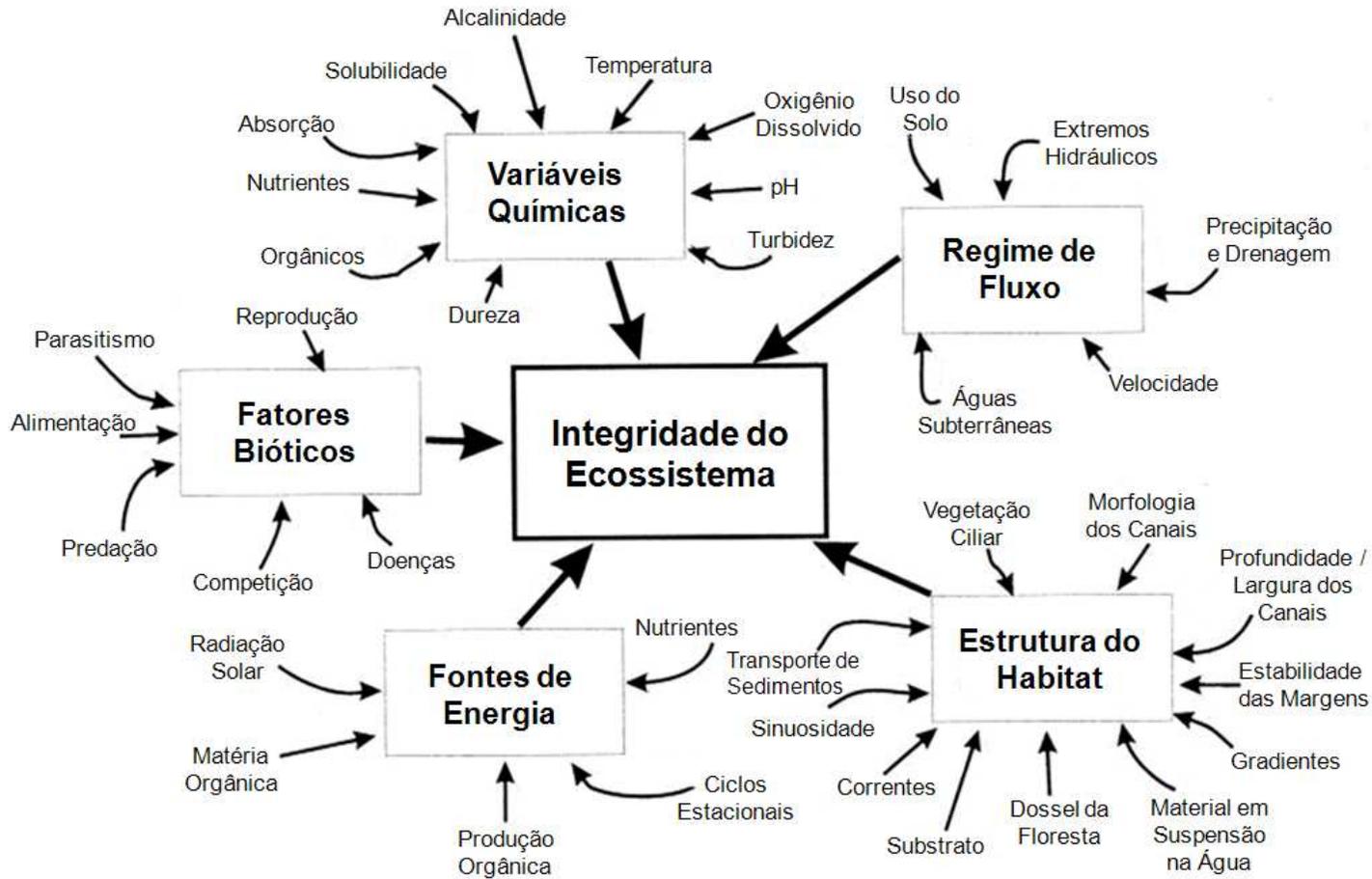
Outra visão da estrutura de um reservatório e sua complexidade envolvendo a bacia hidrográfica, os seus rios e as características morfométricas e ecológicas pode ser demonstrada com a seguinte figura, retirada de Somlyody et al (2001), (Figura 1).

Os modelos devem cobrir todo o espectro ou de forma otimizada a maior parte do espectro da estrutura e função dos ecossistemas; deve-se, entretanto, atentar para as variáveis mais relevantes que possam definir as características essenciais e promovam respostas mais consistentes. Os modelos mais precisos, segundo Straskraba (1973, 1982, 1985) são aqueles baseados em relações determinísticas entre as variáveis e que são derivadas de estudos sistemáticos em determinados rios ou reservatórios. Cada modelo deve ser aplicado e desenvolvido para cada sistema aquático considerado com base em observações, medidas e experimentos. O que ocorre, portanto, é a utilização de um arcabouço intelectual e de grande conhecimento científico e tecnológico aplicado a cada sistema ou subsistema para o qual se tenham medições e informações quantitativas no espaço e no tempo (Figura 2) (Tundisi, 1999). Qualidade e quantidade de água em reservatórios de múltiplos usos, começou a ser considerada de forma mais efetiva nas duas últimas décadas do século 20, especificamente relacionada com o impacto no futuro dos usos múltiplos e também na vazão a jusante como um mecanismo para a manutenção da qualidade da água e da vida aquática a jusante assegurando usos múltiplos. Exacerbação de problemas de saúde humana pela deterioração da qualidade da água a jusante e comprometimento dos “serviços” do ecossistema a jusante foram outras conseqüências levadas em conta na determinação da “vazão ecológica” dos reservatórios (Straskraba, Tundisi & Duncan, 1993; Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008, no prelo).

A utilização da modelagem matemática e ecológica, especificamente no caso da AHE Belo Monte teve os seguintes objetivos:

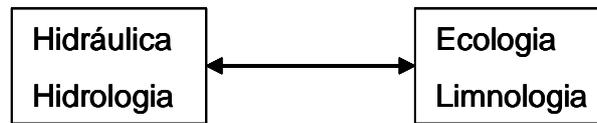
- a) Analisar os possíveis futuros impactos dos usos da bacia hidrográfica, da descarga de poluentes de fontes pontuais e não pontuais, no reservatório principal, especialmente na qualidade da sua água e no reservatório dos canais e a jusante dos dois reservatórios.
- b) Produzir cenários referentes às variáveis físico-químicas, relacionadas à diferentes vazões ao reservatório principal, ao reservatório dois canais com a finalidade de avaliar as respostas da qualidade da água nos vários compartimentos em relação às regras de operação.
- c) Promover através do processo de modelagem matemática e ecológica as melhores alternativas e soluções e possibilitar predições de condições futuras que demandem ações preventivas.

Segundo Jorgensen et al (2005), modelagem matemática e ecológica é uma importante ferramenta de aplicação para o suporte à tomada de decisões. Como o sistema aquático e especialmente, reservatórios e sua operação têm componentes de incerteza, é fundamental o uso de modelagem matemática e ecológica para eliminar incertezas e produzir cenários com as melhores alternativas. Isto é particularmente relevante para o caso de Belo Monte que apresenta componentes de complexidade no seu funcionamento conjunto dos quatro compartimentos.

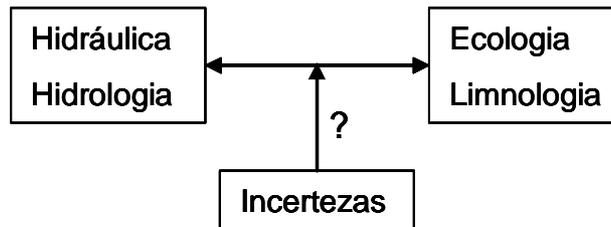


**Figura 1.** Interações entre diversos componentes bióticos e abióticos que mantêm a integridade do ecossistema  
Fonte: Somlyody et al, 2001.

Métodos tradicionais



Abordagens expandidas



Estratégias integradas



Qualidade da água

Integridade dos ecossistemas

### GERENCIAMENTO INTEGRADO E PREDITIVO

**Figura 2.** Progressão das estratégias de gerenciamento para redução de incertezas com o gerenciamento integrado e preditivo de ecossistemas aquáticos (modificado de Mendiondo, 2000).

Entretanto, esta vazão ecológica não depende somente da relação quantidade/qualidade da água liberada a jusante.

Ela depende também das características dos reservatórios: profundidade média e máxima, morfometria, tempo de retenção, tipo de circulação vertical, afetam a qualidade da água do ecossistema artificial e conseqüentemente a qualidade de água liberada a jusante. O tipo de construção do reservatório e o arranjo de engenharia têm um papel fundamental na qualidade da água: a localização no continuum do rio, o volume de água reservado, o tipo de tratamento de bacia hidrográfica antes do enchimento, a altura, da barragem e a relação volume/vazão, que determinou o tempo de retenção e em grande extensão é um fator fundamental na regulação da qualidade da água do reservatório (Tundisi & Straskraba, 1999).

Outro fator de fundamental importância é a relação volume/ área inundada, pois isto determina o tipo de circulação vertical que prevalece.

Se o reservatório apresentar um volume elevado ocupando área relativamente pequena com profundidades que excedem 50 metros, a estratificação subsequente deteriora a qualidade da água e, conseqüentemente pode prejudicar a manutenção de qualidade da água a jusante afetando a vida aquática e os usos múltiplos, especialmente se o sistema de tomada de água for localizado no hipolímnio, o qual geralmente em reservatórios estratificados apresenta baixas concentrações de oxigênio dissolvido e alta carga de DBO (Tundisi, 1984; Straskraba & Tundisi, 2000; Kennedy, 1999).

Reservatórios atuam como concentradores e digestores de matéria orgânica e sua capacidade de respostas a matéria orgânica acumulada, depende do volume e tonelagem da biomassa inicial na área inundada e do tempo de retenção. Geralmente, alto tempo de retenção e alta tonelagem de biomassa inundada (300-400 ton/hect) tem efeito altamente deletério na qualidade da água e na percentagem de saturação do oxigênio dissolvido, sendo emissores importantes de gases de efeito estufa (Tundisi et al, 2005).

Para o caso específico de Belo Monte considerando-se que o reservatório principal tem baixo tempo de retenção, operando a d'água (<10 dias) não haverá segundo Straskraba, Tundisi e Duncan (1993), Straskraba e Tundisi (2000), Straskraba (1999) estratificação térmica e nem mesmo pode-se prever a formação de uma camada hipolimnética. Já o reservatório dos canais tem um período de estratificação que poderá se estender pelos meses da vazante quando o tempo de retenção pode aumentar para até 60 dias produzindo uma estratificação térmica, especialmente em áreas de bolsões de baixa circulação.

Neste caso pode-se prever uma estratificação térmica e química com estabilidade e perda de oxigênio dissolvido durante o período de vazante.

As conseqüências de uma estratificação térmica e química em reservatórios ainda que por períodos reduzidos, são bem conhecidas: impactos na qualidade da água com aumento do Índice de Estado Trófico e redução da qualidade da água no hipotérmico e a jusante do reservatório. Estas condições podem ocorrer no reservatório dos canais e a jusante do mesmo e não no reservatório principal, o que devido às suas características hidráulicas não sofrerá estratificação térmica ou química.

As conseqüências biológicas e ecológicas para o ecossistema a jusante de reservatórios variam, portanto, dependendo não só da quantidade de água liberada, mas da qualidade desta água e, portanto, da **carga liberada a jusante**, a qual depende fundamentalmente do tipo de construção e características de operação do sistema (Hoching & Straskraba, 1994).

Dependendo, portanto, do sistema como um todo (reservatório ou reservatórios; compartimentos; bacia hidrográfica, trechos de rio) pode-se considerá-lo com respostas lineares – o que é extremamente raro e limitado fisicamente com respostas estocásticas e não lineares. Este é o caso mais comum em sistemas de reservatórios (Straskraba, Tundisi & Duncan, 1993).

Entretanto, é fundamental para os cenários e simulação das vazões a jusante, considerar a interação entre qualidade e quantidade, as limitações físicas impostas pelo reservatório no sistema à jusante e a manutenção da qualidade da água e das condições de usos múltiplos a

jusante em função dos **pulsos** liberados. O resultante da presença do reservatório e sua bacia hidrográfica e a gestão operacional do sistema tem como consequência efeitos a jusante que podem ser perfeitamente controlados através de um envelope de opções. Estas opções devem manter tanto quanto possível os **pulsos** a jusante da mesma forma que ocorre com o rio. Pulsos promovem adaptação de todo o sistema de rio pela variação do volume de água e da qualidade da água, portanto, a sua manutenção é essencial para o funcionamento adequado do sistema a jusante.

## 2 Objetivos do presente trabalho

- 2.1 Estudar através de formulação matemática e com dados de campo e de laboratório as respostas dos futuros reservatórios, principalmente dos Canais aos diferentes impactos produzidos pelas ações antrópicas na bacia hidrográfica.
- 2.2 Determinar através de estudo de simulação e com base nos dados coletados em quatro campanhas de campo, as vazões mínimas necessárias para a manutenção da qualidade da água no Rio Xingu a jusante do reservatório Principal e a jusante do reservatório dos Canais. A simulação em vazões mínimas e a qualidade da água devem promover cenários do hidrograma ecológico (ou vazão ecológica) necessárias para a manutenção dos usos múltiplos e da vida aquática do Rio Xingu.
- 2.3 Determinar através de estudos e simulações, as repostas dos reservatórios ao desmatamento, ao crescimento populacional na região (especialmente Altamira) e os impactos positivos ou negativos proporcionados pelo tratamento de esgotos ou pelo lançamento “in natura” do esgoto, sem tratamento. Esses efeitos consideraram repostas até 2035.

## 3 Metodologia

### 3.1 Considerações gerais e condições de contorno.

O trabalho foi realizado considerando-se, a bacia hidrográfica, os dois reservatórios – o reservatório Principal e o reservatório dos Canais – e o Rio Xingu a jusante do reservatório Principal, área denominada como Trecho de Vazão Reduzida, e a jusante do reservatório dos Canais e da usina de geração de energia. Pode-se, portanto, considerar quatro compartimentos, o reservatório Principal, o reservatório dos Canais e dois trechos do Rio Xingu a jusante de cada um dos reservatórios.

As determinações dos impactos dos usos da bacia hidrográfica no reservatório Principal e nos trechos do rio a jusante, bem como no reservatório dos Canais foram feitas a partir dos dados de fontes pontuais e não pontuais de fósforo e nitrogênio; considerando-se diversas escalas de desmatamento na bacia hidrográfica do reservatório Principal; utilizando-se os dados de qualidade da água do Rio Xingu no sítio do reservatório Principal e a jusante do futuro sítio deste reservatório; utilizaram-se também os dados a jusante do futuro sítio do reservatório dos Canais. A estratégia de montagem deste modelo inclui, portanto, os seguintes procedimentos:

- 1) Utilização do modelo MQUAL para a simulação dos dados de fontes pontuais e não pontuais de fósforo e nitrogênio para o futuro reservatório principal.

- 2) Utilização dos dados da qualidade da água do Rio Xingu, acoplados e articulados aos dados de vazão para simulação das cargas e das concentrações de P e N, do oxigênio dissolvido e da DBO e condutividade a partir dos hidrogramas de vazão em m<sup>3</sup>/s.
- 3) O acoplamento do modelo MQUAL com o Índice de Estado Trófico, do futuro reservatório e das condições a jusante, possibilitou simular e determinar a vazão mais favorável para a manutenção da qualidade da água a jusante considerando-se a vazão mínima e máxima.
- 4) A partir destas informações e da simulação, pode-se determinar as condições de operação do futuro reservatório e a resposta do sistema a jusante do futuro reservatório, no Rio Xingu, em relação à qualidade da água e à manutenção da vida aquática e dos usos múltiplos do reservatório.
- 5) Foram também simuladas as concentrações de oxigênio dissolvido na água no reservatório principal em função da percentagem de desmatamento e do consumo de oxigênio dissolvido devido à biomassa afogada. A dependência da qualidade da água dos reservatórios em função da presença ou ausência da vegetação na área inundada é fundamental.
- 6) Reservatório de uma camada.

O Modelo matemático mais apropriado no caso dos reservatórios que irão ser construídos e que ainda não se dispõe dos dados limnológicos, é o modelo que correlaciona o uso do solo da bacia e a qualidade da água. É composto basicamente de um sistema de Informações Georeferenciadas e de um Sistema de Modelos Matemáticos incluindo: (1) modelos simplificados de simulação hidrológica e qualidade da água; (2) modelos ecológicos de risco de eutrofização; e (3) ferramentas de tratamento de dados, análise estatística e produção gráfica.

### **3.2 MQUAL acoplado com o Índice de Estado Trófico (IET)**

O modelo matemático implementado no projeto correlaciona o uso ocupação do solo da bacia com a qualidade da água, este modelo foi inspirado no Modelo de Qualidade de Água (MQUAL), que avalia a concentração de fósforo na bacia. Para tal análise são utilizadas variáveis de influência nesta concentração nos reservatórios, sendo estas:

**Cargas difusas:** geradas pela bacia do reservatório a ser analisado, sendo estas cargas provenientes do uso ocupação do solo desta bacia.

**Cargas pontuais:** Geradas pela população de lançamento direto do esgoto na bacia e pelas cargas exportadas pela bacia.

**Volume:** Com influência direta no tempo de residência do reservatório e na diluição das cargas de fósforo total na água.

**Vazão:** Assim como o volume tem influência direta no tempo de residência, também tem influência na quantidade de cargas exportadas provenientes da bacia a montante.

Coefficientes de exportação: são os coeficientes utilizados que ponderam na estimativa da contribuição de cada tipo de uso ocupação do solo e da população na quantidade de fósforo na bacia em questão.

A seguir são explicados mais detalhadamente quais os tipos destas variáveis utilizadas e as considerações feitas nos cálculos:

Cargas difusas:

- Área de atividade agrícola;
- Floresta;
- Pastagem;
- Área Urbana;
- Área industrial e comercial.

Estas cargas tendem a ser menores no período de estiagem, já que, com a falta de chuva, estas não são transferidas com a mesma intensidade para os reservatórios. Na modelagem feita, estas cargas variam de acordo com a precipitação na bacia.

Cargas pontuais:

Esgoto: estimadas pela quantidade de carga gerada por cada habitante (população humana) da bacia. Segundo Salas & Martino (1991), 1 kg.ano<sup>-1</sup>.hab<sup>-1</sup> para o caso do fósforo, estando diretamente relacionada ao tratamento de esgoto gerado por esta população, o que reduz a carga produzida.

Cargas herdadas: relativas à concentração destas cargas na água que abastece o reservatório. A carga da bacia a montante não é totalmente transferida para a bacia a jusante, sendo parte dela retida no reservatório. No modelo, isto é considerado pela taxa de sedimentação do fósforo calculada conforme o coeficiente de perda de fósforo por sedimentação de Salas & Martino (1991). Para formular esta taxa, foram analisados dados experimentais de 40 lagos e reservatórios na América Latina e Caribe, obtendo, por análise da regressão, a seguinte relação  $K_s$ :

$$K_s = 2/\sqrt{t} \text{ , onde: } t = \text{tempo de residência.}$$

Para o cálculo da exportação de esgoto para a bacia foi considerada a população urbana do local.

Volume e Vazão dos reservatórios:

Volume: um nível mais baixo das águas na bacia tende a aumentar a concentração das cargas. Vista de forma direta:

$$\text{Concentração} = \frac{\text{Massa}(g)}{\text{Volume}(m^3)}$$

Vazão: relaciona-se com a quantidade de carga despejada na bacia, mas também com o tempo de residência do reservatório, ambos de forma direta:

$$Mv = V * Ca$$

$$t = \frac{\text{Volume}}{\text{Vazão}} = \text{Tempo de residência da água no reservatório}$$

Onde:

$Ca$  = Concentração da água que está sendo despejada no reservatório

$V$  = Vazão do reservatório

$Mv$  = Carga despejada através da vazão.

A modelagem realizada apresenta um volume constante, volume médio dos reservatórios, para todos os períodos do ano. No caso da vazão, foram realizadas estimativas para três vazões diferentes para cada reservatório, sendo estas as vazões: mínima, média e máxima, o mesmo foi feito para o caso da precipitação.

Uma vez que a diminuição do volume é inversamente proporcional à concentração de cargas no reservatório, esta diminuição do volume é diretamente proporcional à diminuição no tempo de residência do reservatório, o que pela fórmula de Vollenweider (1976), constata uma diminuição nesta concentração.

#### Coeficientes de exportação:

Os coeficientes de exportação utilizados para o cálculo são os determinados por Salas e Martino (1991) para lagos tropicais, Novotny (1994) e Tanik et al. (1999). E foram obtidos da tese de doutorado “Potencial de poluição de águas superficiais por fontes não pontuais de fósforo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Pinhal, Limeira-SP” de Maria Teresa Castilho Mansor.

#### Fórmulas gerais utilizadas para o cálculo da concentração de fósforo nos reservatórios:

A formula básica para o calculo da estimativa de cargas geradas pela bacia a ser avaliada (cargas difusas, geradas pelo tipo de uso e ocupação do solo e cargas pontuais, geradas pelo esgoto domestico da população que o despeja no reservatório e\ou rios que o alimenta e uma outra carga pontual), é apresentada da seguinte forma:

$$Mb = \underbrace{\frac{k_i \cdot A_i + \dots + k_j \cdot A_j^n}{100}}_{\text{Cargas rurais, uso e ocupação do solo}} + \underbrace{k_L \cdot PL}_{\text{cargas populacionais - tratamento de esgotos}} + \underbrace{I_n}_{\text{outras cargas pontuais}}$$

Sendo:

$Mb$  : Carga gerada na bacia, em kg/dia.

$k_{i...j}$  : Coeficiente de exportação do respectivo uso do solo, dado em kg/km<sup>2</sup>.dia.

$A_{i...j}$  : Área em hectares do respectivo tipo de uso e ocupação do solo, relacionado a  $k_{i...j}$ . A divisão por 100 converte essas áreas de hectare para km<sup>2</sup>.

$k_L$  : Coeficiente de exportação relativo a população com lançamento direto, dado em kg/hab.dia.

PL: População com lançamento direto de esgoto.

$I_n$  : Somatória das cargas pontuais diárias na bacia, em kg/dia.

Para o cálculo das cargas exportadas pela bacia a montante, a fórmula empregada é apresentada a seguir:

$$Mv = Vazao * Ca * (3600 * 24 / 1000)$$

$Ca$ : Concentração da água que está sendo despejada no reservatório, em g/ m<sup>3</sup>.

$Vazão$ : Vazão de entrada no reservatório, em m<sup>3</sup>/s.

$Mv$ : Carga despejada através da vazão, em kg/dia.

Modelo empírico de Vollenweider – 1976, com coeficiente de sedimentação do fósforo de Salas e Martino (1991):

$$Mc = \frac{L}{V * \left( \frac{1}{t} + \frac{2}{\sqrt{t}} \right)}$$

Onde:

$L$ : Carga das contribuições, sendo:  $(Mv+Mb)*365*1000$ , assim sendo dado em g/ano.

$V$ : Volume, em m<sup>3</sup>.

$t = \frac{Volume}{Vazão}$  = tempo de residência da água no reservatório, em anos, para isto Vazão é dada em m<sup>3</sup>/ano.

$\frac{2}{\sqrt{t}}$

: Coeficiente de sedimentação (Salas e Martino – 1991)

$Mc$ : Concentração do fósforo no reservatório, em g/ m<sup>3</sup>.

Para o incremento anual da população:

$$Pf = Pi * (1 + x)^n$$

$n$ : anos

$x$ : taxa de crescimento anual

$Pi$ : população inicial

$Pf$ : População estimada

### Índice de Estado Trófico:

O cálculo do Índice de Estado Trófico foi feito de acordo com a CETESB, utilizando apenas os dados de fósforo (P), este índice pode ser calculado tanto para reservatórios como para rios.

1) Índice de Estado Trófico para Reservatório:

- $IET (PT) = 10x(6 - (1,77 - 0,42x(\ln PT)/\ln 2))$

2) Índice de Estado Trófico para Rios:

- $IET (PT) = 10x(6 - ((0,42 - 0,36x(\ln PT))/\ln 2)) - 20$

O IET é clacificado da seguinte da seguinte maneira:

Categoria estado trófico	Ponderação
Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$
Oligotrófico	$47 < IET \leq 52$
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$
Eutrófico	$59 < IET \leq 63$
Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$
Hipereutrófico	$IET > 67$

## 4 Resultados

### 4.1 Considerações gerais

Para o trabalho foram considerados quatro compartimentos com a finalidade de verificar e determinar os impactos da carga de fósforo e de matéria orgânica na qualidade da água do Rio Xingu. Estes compartimentos foram (assinalados na Figura 61):

- 1) A área de influência e a área de inundação do futuro reservatório principal.
- 2) Trecho de Vazão Reduzida.
- 3) A área de influência do futuro reservatório dos canais até a casa de força (Belo Monte).
- 4) A área a jusante do futuro reservatório dos canais até o ponto RX16, última estação de coleta de amostras.

Segundo Kerekes (1981) os resultados podem ser muito otimizados se o reservatório ou reservatórios forem tratados como uma série de compartimentos interconectados com a saída de um dos compartimentos sendo a entrada de outro compartimento. A determinação da concentração média de fósforo em um lago ou reservatório é muito difícil pois requer um número elevado, em muitos casos, de pontos de coleta. No caso específico da AHE de Belo Monte, procurou-se utilizar um número representativo de pontos de coleta para diminuir as incertezas, portanto, cada ponto representa inúmeros pontos em uma determinada área. Isto otimiza resultados e diminui incertezas.

Procurou-se compartimentalizar para assegurar maior certeza no processo de modelagem. Uma cadeia de compartimentos como a proposta é desenvolvida neste trabalho, aproxima-se das condições de uma cadeia de reatores de mistura, o que otimiza e aproxima melhor os cálculos preditivos.

Pro outro lado, como afirmam Straskraba (1973); Straskraba, Tundisi & Duncan (1993) e Straskraba & Tundisi (1999, 2000) o sistema de compartimentos deve incluir a bacia hidrográfica e os impactos provenientes de cada bacia hidrográfica em cada um dos compartimentos.

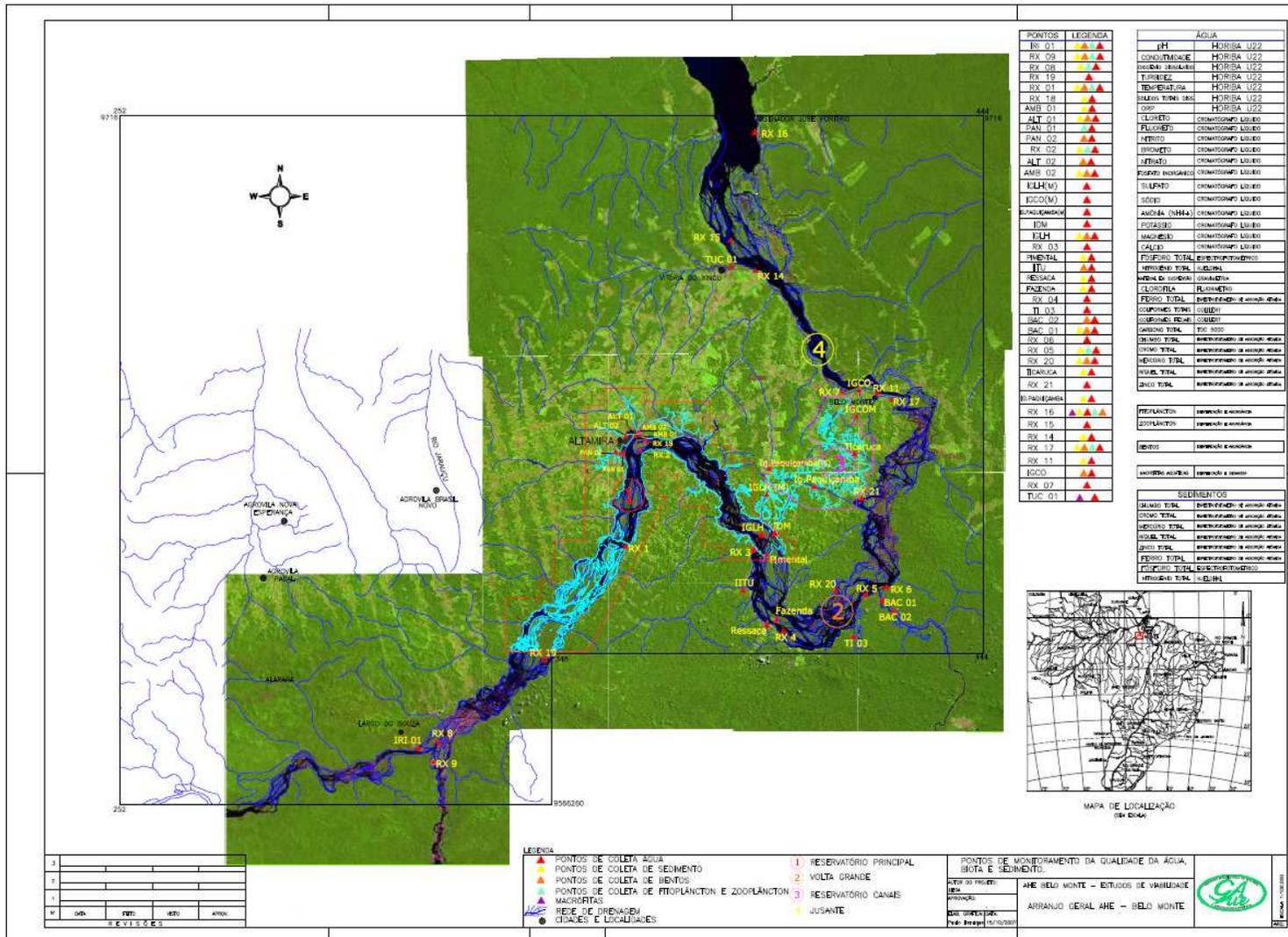
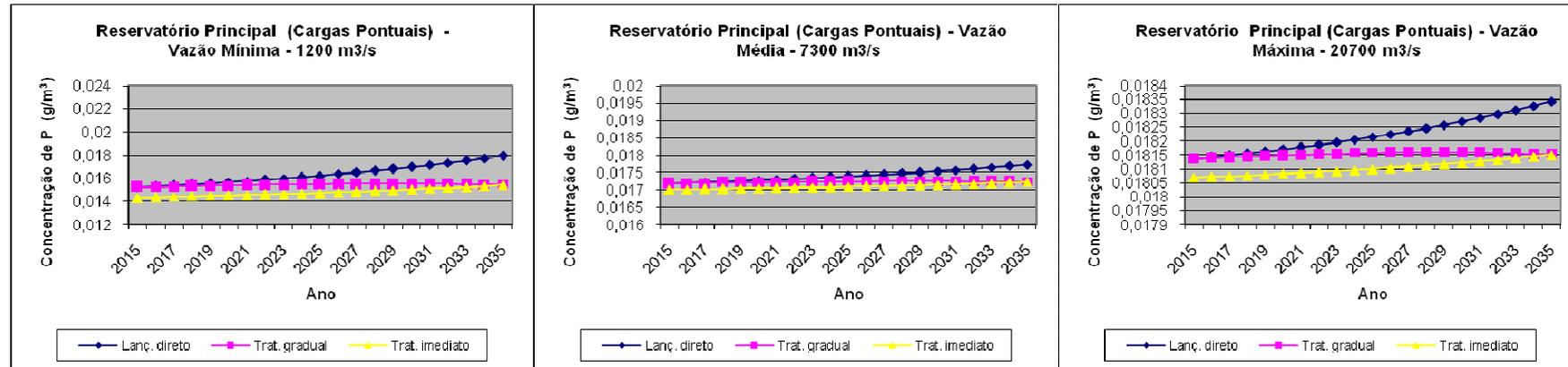


Figura 61: Mapa com a delimitação dos pontos de coleta e dos 4 compartimentos utilizados para a modelagem matemática.

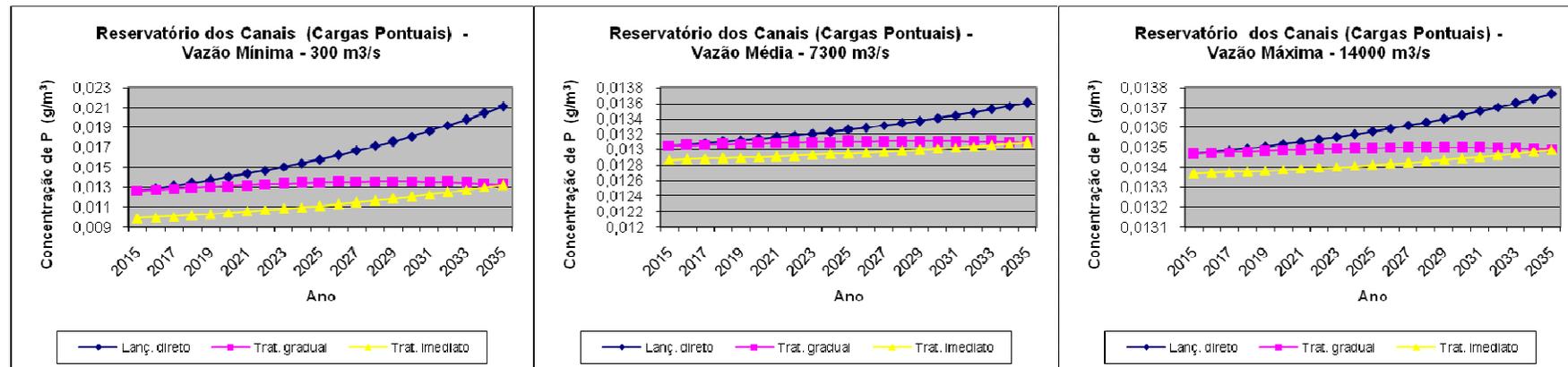
## 4.2 MQUAL

Com a utilização do modelo baseado no MQUAL para o Reservatório Principal e o Reservatório dos Canais obtivemos a evolução da concentração de fósforo ( $\text{g/m}^3$ ), como podemos ver nas Figuras 3 e 4, baseada na entrada de cargas pontuais de fósforo, simulando cenários para situações com lançamento direto, tratamento gradual, e tratamento imediato de esgoto, onde as vazões mínimas, médias e máxima são respectivamente, para o Reservatório Principal, 1200, 7300 e 20700  $\text{m}^3/\text{s}$ , e para o Reservatório dos Canais, 300, 7300 e 14000  $\text{m}^3/\text{s}$ , já as Figuras 5 e 6 mostram a evolução da concentração de fósforo ( $\text{g/m}^3$ ) nas cargas difusas em ambos reservatórios, baseada no desmatamento da área de influência da bacia dos mesmos, com crescimento populacional estipulado em 5,30% ao ano. Os dados de vazão foram obtidos no ano de 2007 no Posto Fluviométrico de Altamira e a Curva-chave para o rio Xingu.

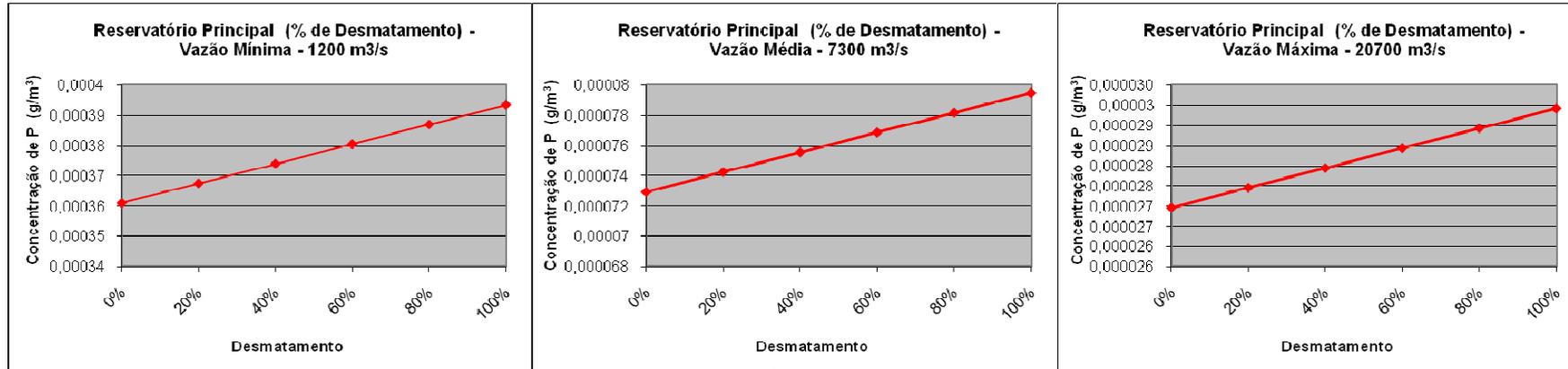
As cargas difusas para o Reservatório Principal foram calculadas a partir de mapas e das imagens de satélite geoprocessados de forma a garantir que o mosaico de vegetação e das atividades na bacia hidrográfica, a partir dos usos do solo, pudesse ser representado e os cálculos realizados utilizando-se as fórmulas descritas em Jorgensen & Vollenweider (1988). As cargas pontuais foram calculadas a partir dos dados da população total da bacia hidrográfica e utilizando-se os dados de Henderson-Sellers et al (1993). O total das cargas difusas e das cargas pontuais foi utilizado como **entrada** para cálculo da progressão da concentração de fósforo no Reservatório dos Canais em condições de lançamento direto, tratamento gradual e tratamento imediato dos esgotos de origem doméstica no caso das cargas pontuais (Figuras 3 e 4). Os resultados mostram a evolução da concentração de P em um período de 20 anos, evidenciando o aumento de P no reservatório, com o lançamento direto e os resultados para tratamento gradual e tratamento imediato corroboram a hipótese de que o aumento de P devido aos esgotos domésticos e ao **desmatamento** da bacia hidrográfica poderão ser a causa fundamental da eutrofização do Reservatório dos Canais.



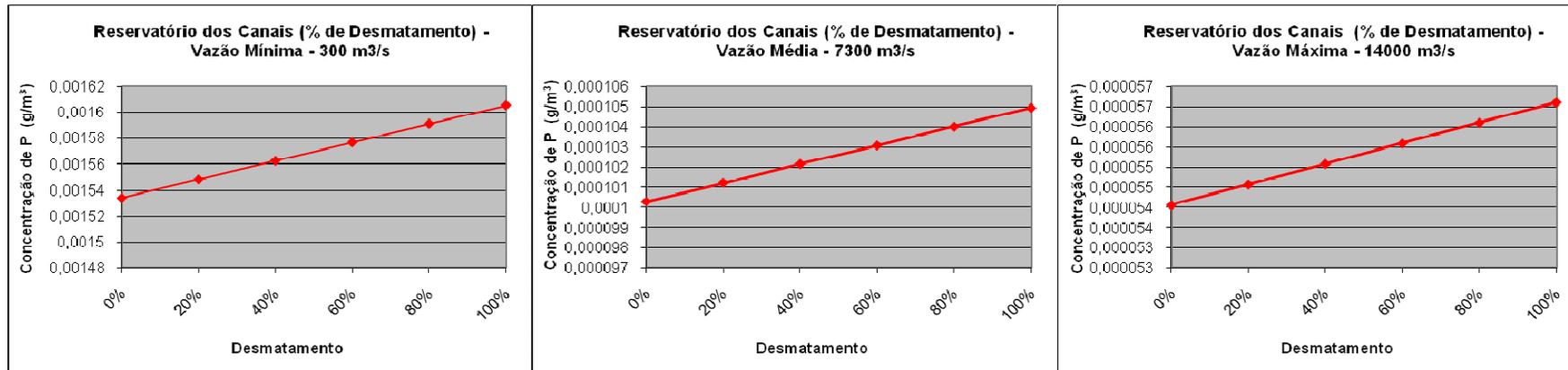
**Figura 3:** Evolução da concentração de Fósforo ( $\text{g/m}^3$ ), nas cargas pontuais, presente no Reservatório Principal.



**Figura 4:** Evolução da concentração de fósforo ( $\text{g/m}^3$ ), nas cargas pontuais, presente no Reservatório dos Canais.



**Figura 5:** Evolução da concentração de fósforo (g/m<sup>3</sup>), nas cargas difusas, presente no Reservatório Principal.



**Figura 6:** Evolução da concentração de fósforo (g/m<sup>3</sup>), nas cargas difusas, presente no Reservatório dos Canais.

### 4.3 Índice de Estado Trófico

O Índice do Estado Trófico tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas.

Nas Figuras 7 e 8 encontram-se os resultados da simulação do IET para os dois reservatórios, observa-se que o tratamento do esgoto da cidade de Altamira é de extrema importância, pois percebe-se pelos gráficos que no decorrer dos anos o IET tende a crescer, e os reservatórios passam a ser classificados como eutróficos.

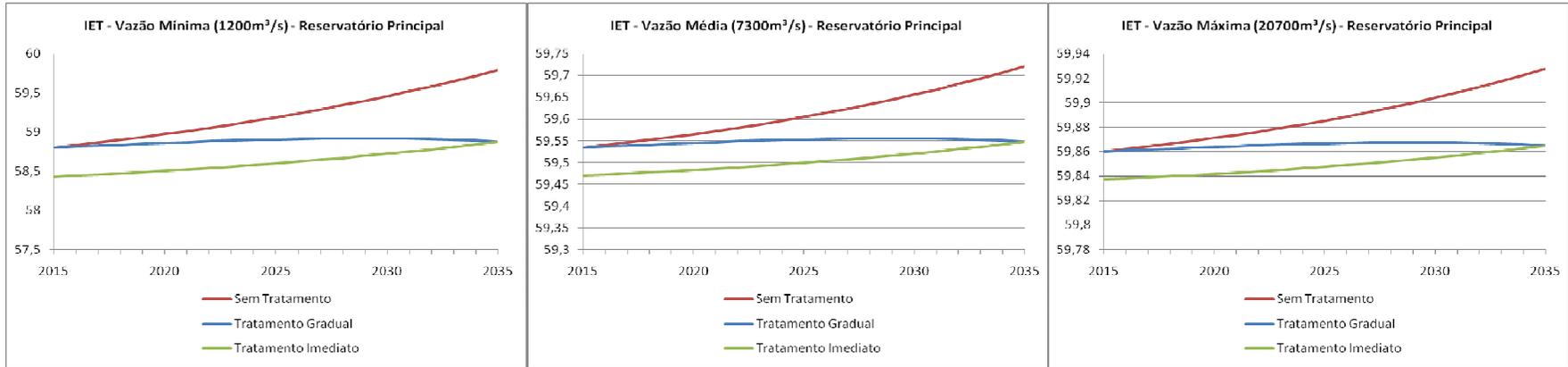


Figura 7: Índice do estado trófico no Reservatório Principal.

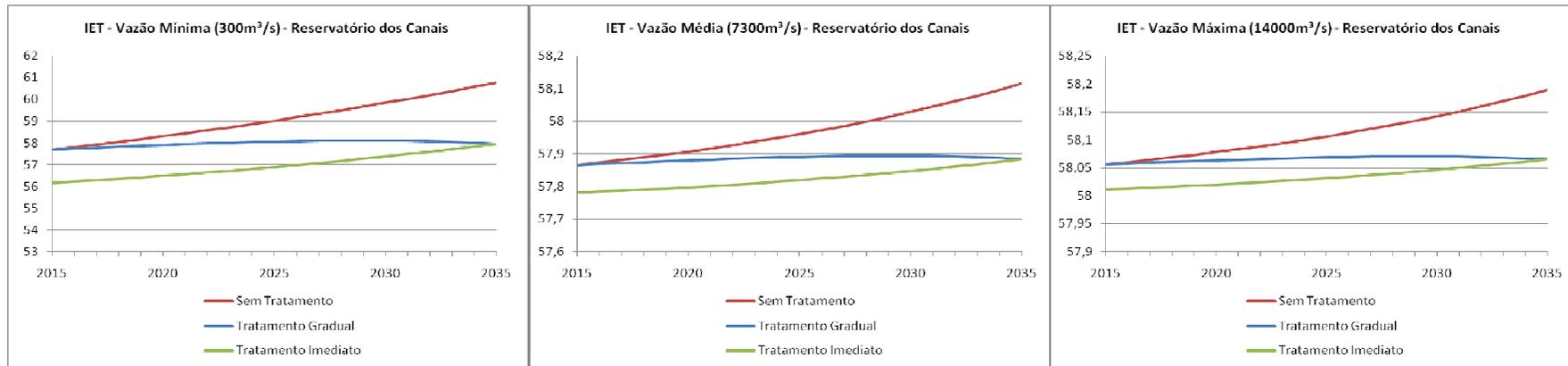
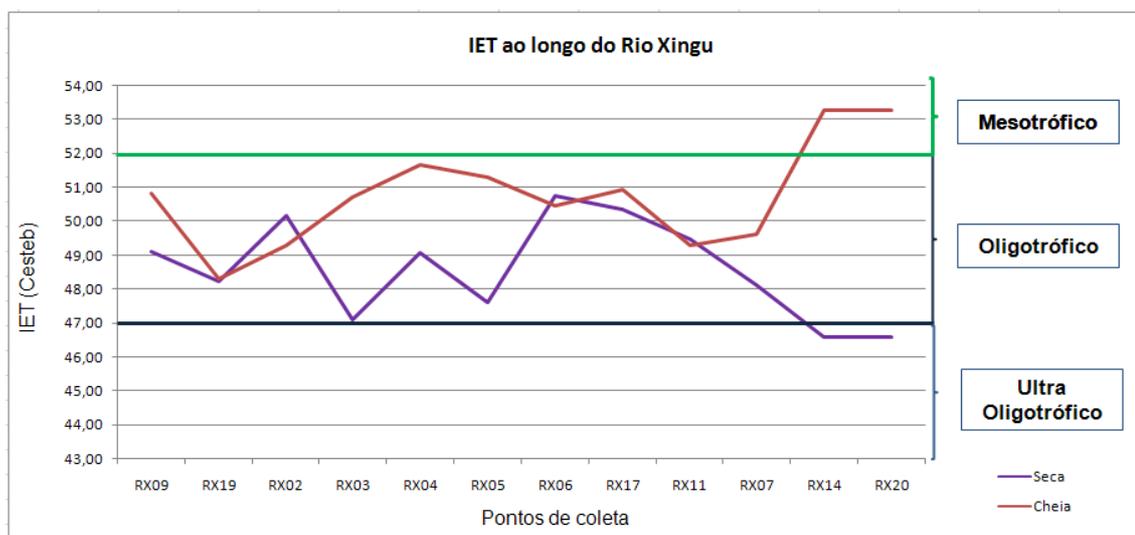
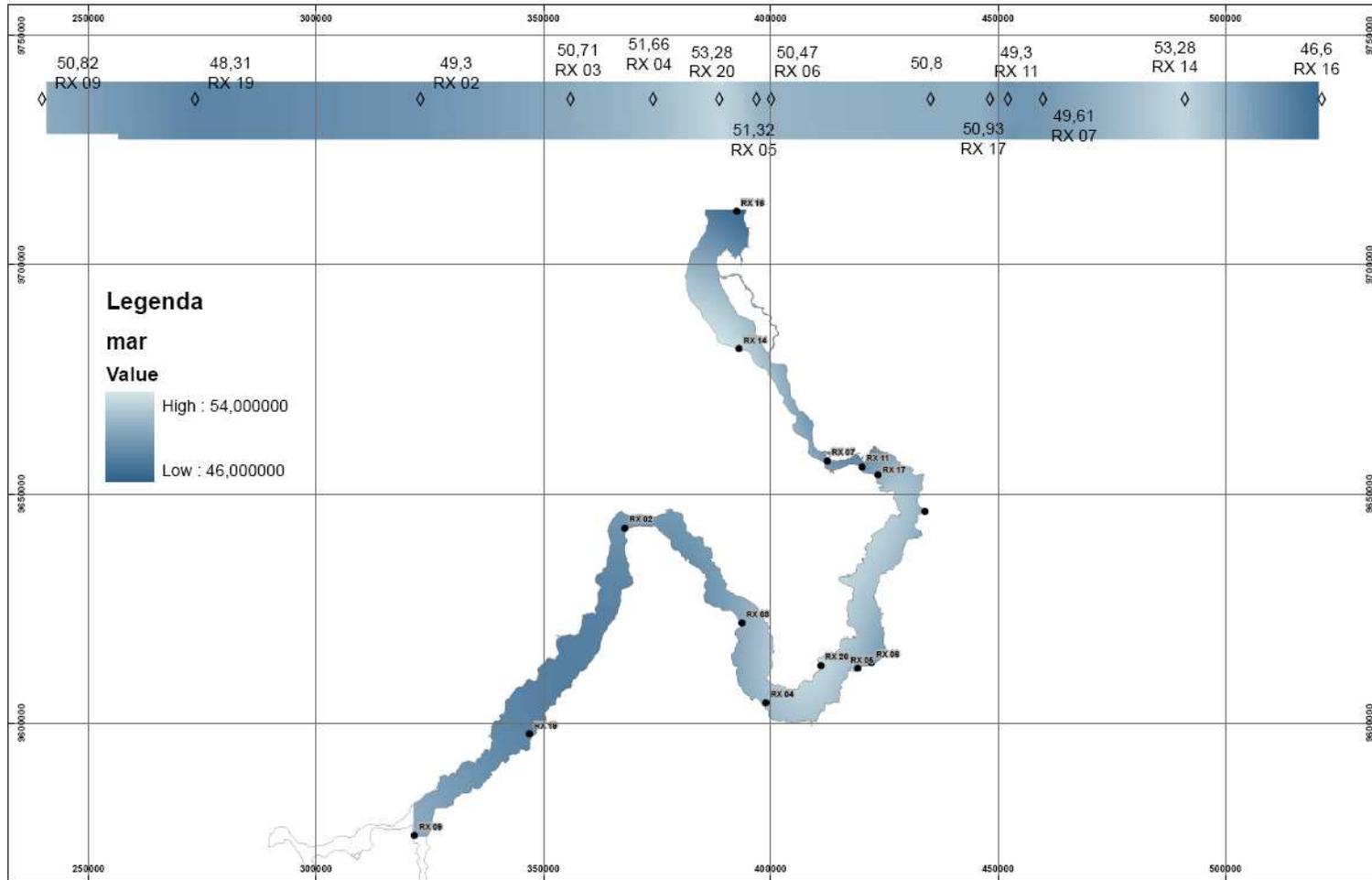


Figura 8: Índice do estado trófico no Reservatório dos Canais

As figuras 9, 10 e 11 mostram a especialização do IET ao longo Rio Xingu, para as épocas de cheia e seca. A maior parte do trecho que compreende todas as estações de coleta mostra um rio predominantemente oligotrófico com alguns pontos passando a mesotróficos durante a cheia (pontos RX14 e RX20). A razão disto é que material orgânico carreado pó ter sido aumentado durante o período de cheia nesses dois pontos localizados a jusante da Volta Grande do Xingu (RX14) e na volta Grande (RX20). Este acúmulo de material orgânico, que pode ter ocorrido durante a seca provavelmente foi carreado resultando em aumento do índice. No entanto, esta finalidade da água nesses dois pontos não implicará no futuro reservatório, e nem significativa redução da qualidade das águas do rio.

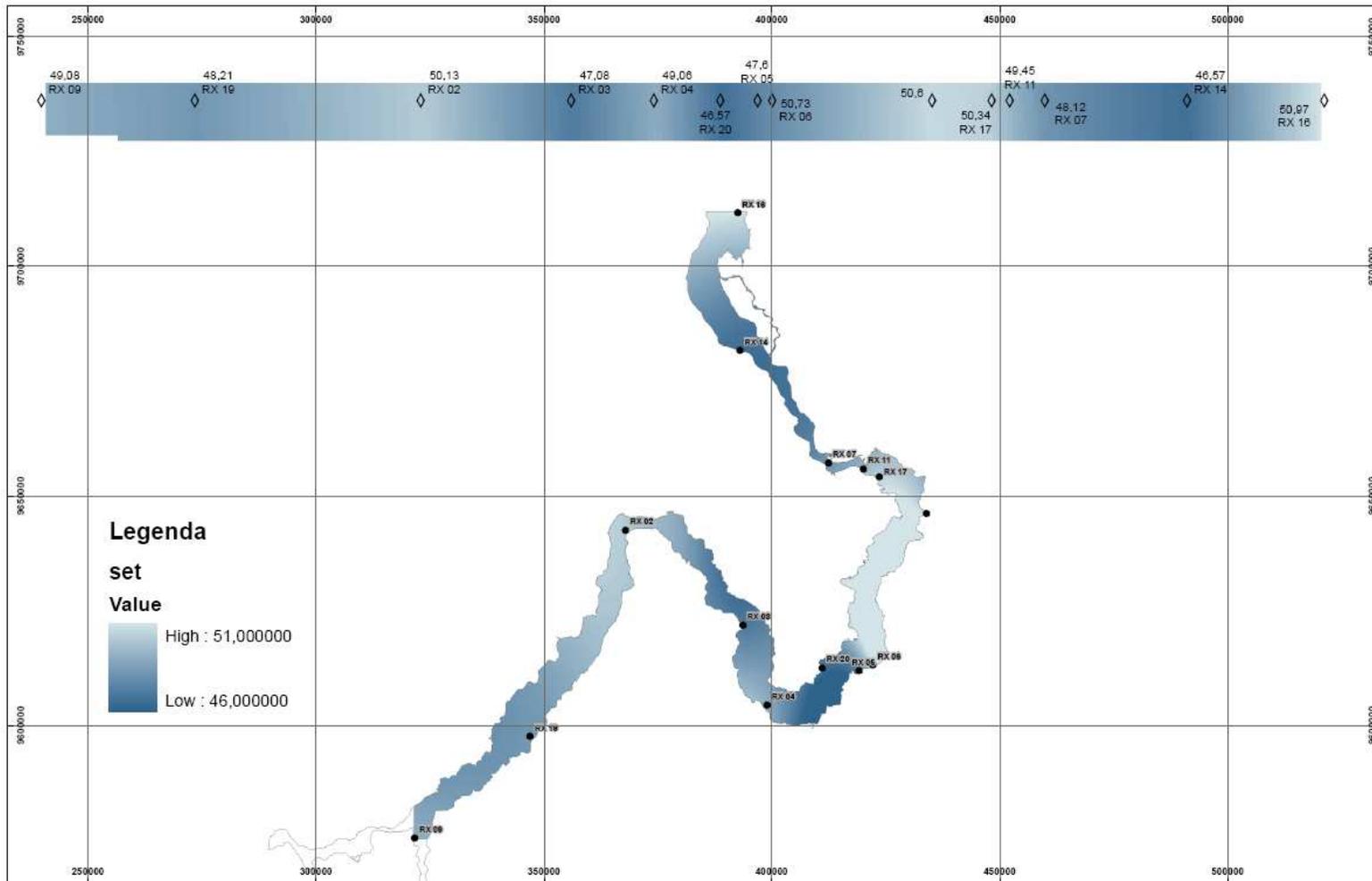


**Figura 9.** Nível do Índice de Estado Trófico ao longo do Rio Xingu.



QA - MARÇO

Figura 10. Espacialização do IET ao longo do Rio Xingu na cheia.



QA - SETEMBRO

Figura 11. Espacialização do IET ao longo do Rio Xingu na vazante.

#### 4.4 Simulação de Estratificação no Reservatório dos Canais

Devido ao alto tempo de residência da água no Reservatório dos Canais, principalmente na época de estiagem, como pode-se verificar na Tabela 1, viu-se necessário um estudo mais aprofundado nesse reservatório. Para o estudo da estratificação foi calculado a resistência térmica à circulação, a estabilidade do sistema, o déficit relativo de O<sub>2</sub> e a saturação de O<sub>2</sub> no reservatório na fase de reenchimento.

Nota-se na tabela 2 que o mesmo não ocorre para o Reservatório Principal, pois na fase de estiagem ele terá uma vazão mínima superior à do Reservatório dos Canais.

**Tabela 1:** Tempo de Residência da água no Reservatório dos Canais.

Tempo de residência com uma vazão de 300 m <sup>3</sup> /s (dias)	Tempo de residência com uma vazão de 7300 m <sup>3</sup> /s (dias)	Tempo de residência com uma vazão de 14000 m <sup>3</sup> /s (dias)
69	3	1

**Tabela 2:** Tempo de Residência da água no Reservatório Principal.

Tempo de residência com uma vazão de 1200 m <sup>3</sup> /s (dias)	Tempo de residência com uma vazão de 7300 m <sup>3</sup> /s (dias)	Tempo de residência com uma vazão de 20700 m <sup>3</sup> /s (dias)
19	3	1

##### 4.4.1 Resistência Térmica à Circulação (RTC)

A Resistência Térmica à Circulação expressa a resistência da água à circulação promovida pelo vento. Essa resistência foi determinada utilizando a seguinte equação:

**Resistência térmica a circulação**

$$RTC = \frac{d_{t2} - d_{t1}}{dH_2O(4) - dH_2O(5)}$$

Onde: *RTC* - Resistência térmica à circulação

*d<sub>t1</sub>* - densidade da água à temperatura *t<sub>1</sub>*

*d<sub>t2</sub>* - densidade da água à temperatura *t<sub>2</sub>*

*dH<sub>2</sub>O(4)* - densidade da água à temperatura de 4°C

*dH<sub>2</sub>O(5)* - densidade da água à temperatura de 5°C

Nas Tabelas de 3 à 5 temos o resultado de cálculos realizados para a Retenção Térmica à Circulação. Observa-se que quanto maior for a diferença entre a temperatura *t<sub>1</sub>*, temperatura

na superfície do reservatório, e a temperatura  $t_2$ , temperatura no fundo do reservatório, maior será a Resistência Térmica à Circulação.

• Tabela 3:

- Temperatura na superfície: 33°C;
- Temperatura no Fundo: 27°C – 32°C;

<b>Resistência Térmica a Circulação</b>		
<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>Resultado</b>
33	27	223,617284
33	28	189,074074
33	29	153,419753
33	30	116,641975
33	31	78,8148148
33	32	39,9259259

• Tabela 4:

- Temperatura na superfície: 32°C;
- Temperatura no Fundo: 27°C – 31°C;

<b>Resistência Térmica a Circulação</b>		
<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>Resultado</b>
32	27	183,691358
32	28	149,148148
32	29	113,493827
32	30	76,7160494
32	31	38,8888889

• Tabela 5:

- Temperatura na superfície: 31°C;
- Temperatura no Fundo: 27°C – 30°C;

<b>Resistência Térmica a Circulação</b>		
<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>Resultado</b>
31	27	144,802469
31	28	110,259259
31	29	74,6049383
31	30	37,8271605

#### 4.4.2 Estabilidade do Sistema

O termo e o conceito de estabilidade (S), introduzido por Schmidt (1915, 1928 – in Cole, 1983), representa a quantidade de trabalho necessária para a represa apresentar uma densidade uniforme sem adição ou subtração de calor.

A Estabilidade do Sistema foi determinada utilizando a seguinte equação:

### Estabilidade do sistema

$$S = \int_{Z_0}^{Z_m} (\rho_Z - \rho) (A_Z) (Z - Z_0) dz$$

$A_0$

- Onde:
- $A_0$  - área da superfície em  $\text{cm}^2$
  - $A_Z$  - área em  $\text{cm}^2$  a uma profundidade  $Z$
  - $\rho_Z$  - densidade a uma profundidade  $Z$
  - $\rho$  - densidade média ou final
  - $Z_m$  - profundidade máxima
  - $Z$  - a superfície do lago ou reservatório
  - $Z_0$  - profundidade em cm e onde se encontra  $\rho$

Nas Tabelas de 6 a 8 temos o resultado de cálculos realizados para a Estabilidade do Sistema, as profundidades do reservatório dos canais assumidas para este cálculo são respectivamente, 27 m, 40 m e 47 m. Observa-se que quanto maior for a diferença entre a temperatura  $t_1$ , temperatura na superfície do reservatório, e a temperatura  $t_2$ , temperatura no fundo do reservatório, e também quanto mais profundo for o reservatório, maior será o trabalho necessário para a represa apresentar uma densidade uniforme.

• Tabela 6:

- Profundidade: 27m;
- Temperatura na superfície: 33°C;
- Temperatura no Fundo: 27°C – 32°C;

Estabilidade - Profundidade 27 m			
t1	t2	Densidade Média	Resultado
33	27	0,99563645	261,6422850
33	28	0,99549655	221,2251750
33	29	0,99535215	179,5080150
33	30	0,9952032	136,4763599
33	31	0,99505	92,2168800
33	32	0,9948925	46,7151300

• Tabela 7:

- Profundidade: 42m;
- Temperatura na superfície: 33°C;
- Temperatura no Fundo: 27°C – 32°C;

<b>Estabilidade - Profundidade 42 m</b>			
<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>Densidade Média</b>	<b>Resultado</b>
33	27	0,99563645	406,9991102
33	28	0,99549655	344,1280502
33	29	0,99535215	279,2346900
33	30	0,9952032	212,2965600
33	31	0,99505	143,4484802
33	32	0,9948925	72,6679802

• Tabela 8:

- Profundidade: 47m;
- Temperatura na superfície: 33°C;
- Temperatura no Fundo: 27°C – 32°C;

<b>Estabilidade - Profundidade 47 m</b>			
<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>Densidade Média</b>	<b>Resultado</b>
33	27	0,99563645	455,4513850
33	28	0,99549655	385,0956751
33	29	0,99535215	312,4769149
33	30	0,9952032	237,5699599
33	31	0,99505	160,5256800
33	32	0,9948925	81,3189300

#### 4.4.3 Déficit Relativo de O<sub>2</sub>

O déficit relativo de oxigênio é a diferença entre duas determinações, uma durante o período de máxima estratificação e outra durante o período de máxima circulação. Este “déficit” permite que se calcule por unidade de área do hipolimnio a depleção de oxigênio ocorrida durante um determinado período.

O déficit relativo de oxigênio dissolvido pode ser obtido pela fórmula:

$$\frac{M1 - M2}{\partial t}$$

- Onde:
- M1 – Conteúdo de oxigênio no período de circulação máxima em um volume que corresponde ao volume do hipolimnio em M2.
  - M2 – Conteúdo de oxigênio no hipolimnio.
  - ∂t – Intervalo de tempo entre as medidas na concentração M1 e M2.

No início da estratificação forma-se um hipolimnio que não apresenta trocas de oxigênio com a superfície. Com a evolução do processo, aumenta o consumo de oxigênio dissolvido no hipolimnio, aumentando o déficit de oxigênio. O déficit relativo de oxigênio dissolvido, é,

portanto, a relação entre o conteúdo de oxigênio dissolvido em um volume que corresponde ao volume total do lago, (M1) e o oxigênio dissolvido que corresponde ao volume do hipolimnio (M2). Sendo M1 100% de saturação de oxigênio dissolvido em todo o lago (durante o período de circulação total) e 0% a concentração de oxigênio dissolvido no hipolimnio (M2), o déficit relativo será 16,67%. Se M1 for 100% de saturação e M2 tiver 10% de saturação no hipolimnio o déficit relativo será de 15.0 % e assim por diante, ver Tabela 9. O resultado significa que quanto menor a concentração de O<sub>2</sub> no hipolimnio, maior será o déficit relativo de oxigênio dissolvido em combinação com a estratificação e estabilidade.

- Tabela 9:
  - M1: 100% de saturação de O<sub>2</sub>;
  - M2: 0% - 50% de saturação de O<sub>2</sub>;
  - $\delta t$ : 6 meses;

<b>Déficit Relativo de oxigênio</b>		
<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>Resultado</b>
100%	0%	16,67%
100%	10%	15,00%
100%	20%	13,33%
100%	30%	11,67%
100%	40%	10,00%
100%	50%	8,33%

#### 4.4.4 Saturação de O<sub>2</sub> na fase reenchimento

A figura 12 mostra o tempo necessário, em dias, para o reservatório dos canais recuperar a concentração de oxigênio dissolvido com diferentes vazões. Verifica-se que com as maiores vazões provenientes dos canais (3.639; 7.745; 14.000 m<sup>3</sup>/s) o tempo de recuperação da concentração de O<sub>2</sub> dissolvido no reservatório dos canais (após o período da vazante e estratificação com déficit de O<sub>2</sub> dissolvido) é de no máximo 10 dias.

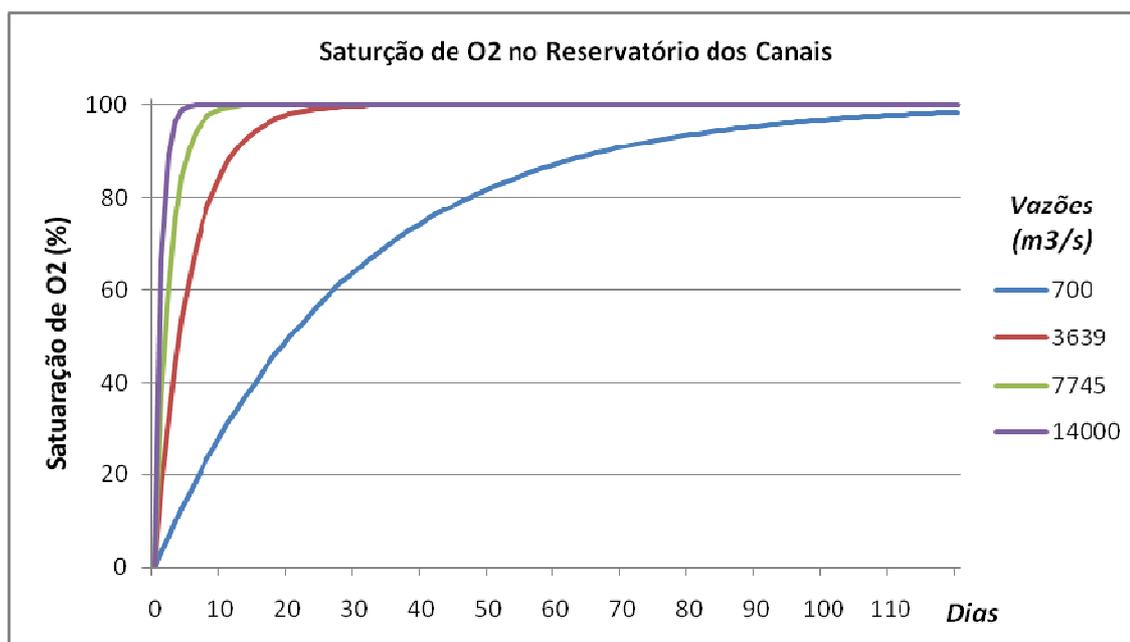


Figura 12: Saturação de O<sub>2</sub> na Fase de Reenchimento do Reservatório dos Canais.

#### 4.4.5 Discussão

As diferenças térmicas e de densidade no gradiente vertical determinam as características básicas de lagos e represas em relação à circulação vertical. Os cálculos que foram realizados para o reservatório dos canais (uma vez que o reservatório principal não sofrerá estratificação, baseando-se em dados obtidos para outros reservatórios e lagos onde diferenças significativas de densidade da água ocorrem em temperatura acima de 25°C (temperatura da água).

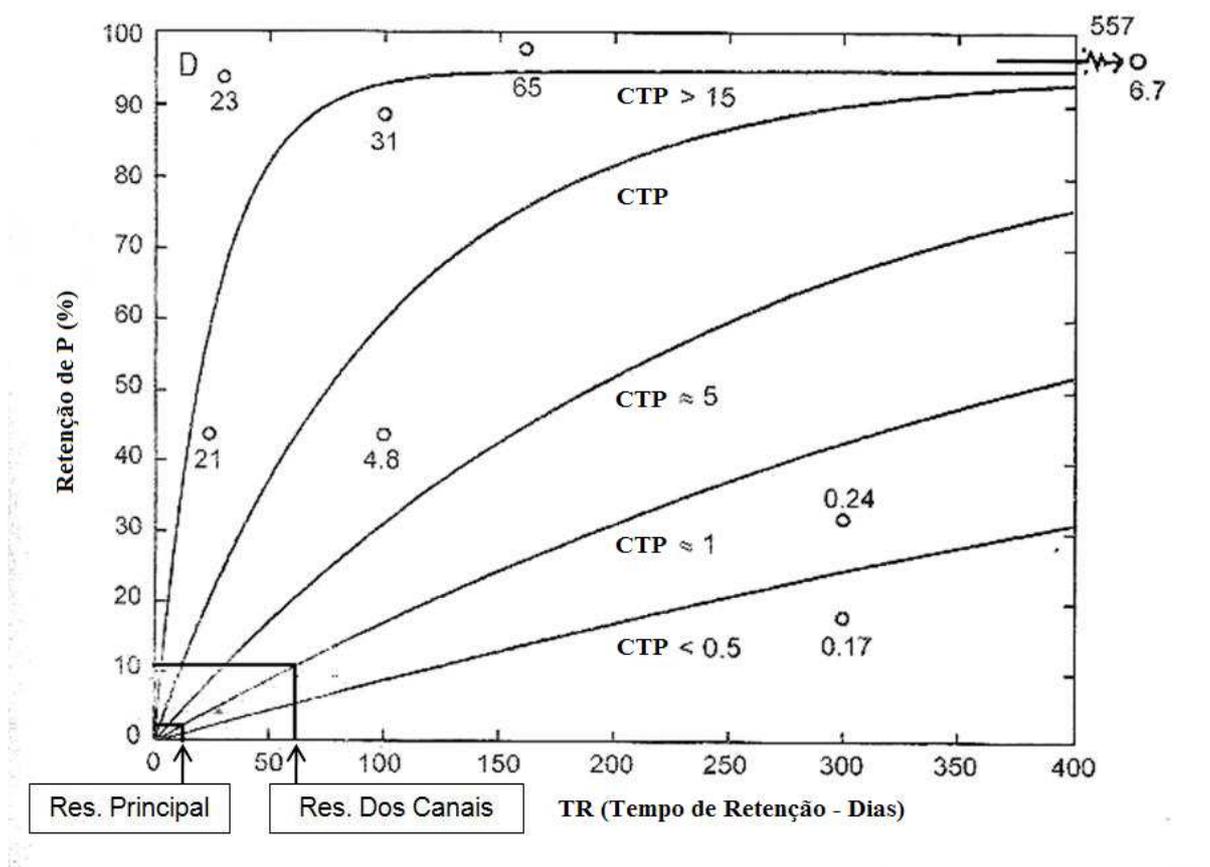
Portanto os dois calculos: a resistência térmica à circulação e a estabilidade do sistema referem-se, no primeiro caso, ao gradiente de densidade, o que impede a circulação. Simularam-se temperaturas de superfície de 33°C; 32°C; 31°C com base em resultados obtidos de outros sistemas amazônicos (Tucuruí, Lago Jacaretinga, Represa de Samuel), e de temperaturas de fundo também obtidas nos mesmos sistemas. Os resultados mostram maior resistência térmica à circulação quanto maior a diferença de temperatura. Já a estabilidade do sistema mostra o trabalho do vento necessário para circular verticalmente todo o reservatório. Com maior estabilidade há menos circulação e, portanto, mais estável é a estratificação térmica e química e maior sua permanência, no tempo, pelo menos durante o período com maior tempo de retenção. Os dois resultados mostram a probabilidade de um sistema estável quimicamente e termicamente, no eixo vertical com a evolução para um hipolimnio com baixa concentração de oxigênio dissolvido ou mesmo anoxia, gradientes verticais de temperatura de água e densidade.

Com um tempo de retenção na estiagem de 69 dias, entre 10% e 15% do fósforo reativo é retido no reservatório como podemos ver na Figura 13 (Straskraba 1999, Jorgensen 2005). A retenção de fósforo pelo reservatório pode significar um aumento considerável da poluição primária e florescimento do fitoplâncton (especialmente cianobactérias), pois o fósforo é o principal fator limitante. Se houver uma estratificação térmica como demonstrado pela resistência térmica à circulação o acúmulo de fósforo no hipolíminio anóxico combinado com a retenção é elevado. Fósforo solúvel ocorre no hipolíminio anóxico. A Figura 13 mostra o tempo de retenção de fósforo para vários reservatórios no Brasil em função da carga total de fósforo (CTF) a partir de bacias hidrográficas. Esta curva mostra onde se situa o reservatório

dos canais neste contexto de retenção de fósforo. Considerando-se o contexto de problemas nos vários compartimentos (4) do AHE Belo Monte deve-se assinalar e enfatizar que o principal problema de gestão situa-se no reservatório dos canais devido ao tempo de retenção e à possível estratificação térmica do ecossistema que será maior ou menor (mais estável ou menos estável) em função da profundidade. A probabilidade de formar florescimento de cianobactérias e de aumento de biomassa de macrófitas aquáticos flutuantes (Tundisi & Matsumura Tundisi 2008) é grande nesta situação de tempo de retenção, grau de trofia e estratificação térmica e química.

Acresce, ainda que no caso do reservatório dos canais há, um sistema de vales e bolsões que dificultam a circulação. Nesses vales e bolsões haverá profundidades de até 47 metros o que juntamente com a proteção do vento dificulta a circulação vertical.

Portanto, a conclusão quanto à estratificação no reservatório dos canais é a de que haverá estratificação térmica e química no período da vazante, deteriorando a qualidade da água com passíveis repercussões à jusante deste reservatório.



**Figura 13:** Porcentagem de Retenção de P (Fósforo) em Reservatórios por Tempo de Retenção.

## 4.5 Simulação para o Trecho de Vazão Reduzida

### 4.5.1 Condutividade Relacionada à Vazão no Trecho de Vazão Reduzida

Para a análise da condutividade no Trecho de Vazão Reduzida foram tomados 4 pontos, de coleta de dados:

1. RX03 – Ponto localizado logo na saída do Reservatório Principal;
2. BAC01 – Ponto localizado no Rio Bacajá, rio este que tem alta influência na qualidade da água do Rio Xingu na época de seca;
3. RX06 – Ponto a jusante do Rio Bacajá;
4. RX17 – Ponto próximo a AHE Belo Monte.

As Figuras 14 e 15 mostram respectivamente os dados de Condutividade e de vazão no Trecho de Vazão Reduzida. Observa-se que na época de estiagem o Rio Bacajá tem um alto índice de condutividade em comparação com o Rio Xingu, observa-se também que o ponto RX06 recebe uma alta influência do Rio Bacajá nesta época, mas esta influência não se prolonga no Rio Xingu, como observamos no ponto RX 17.

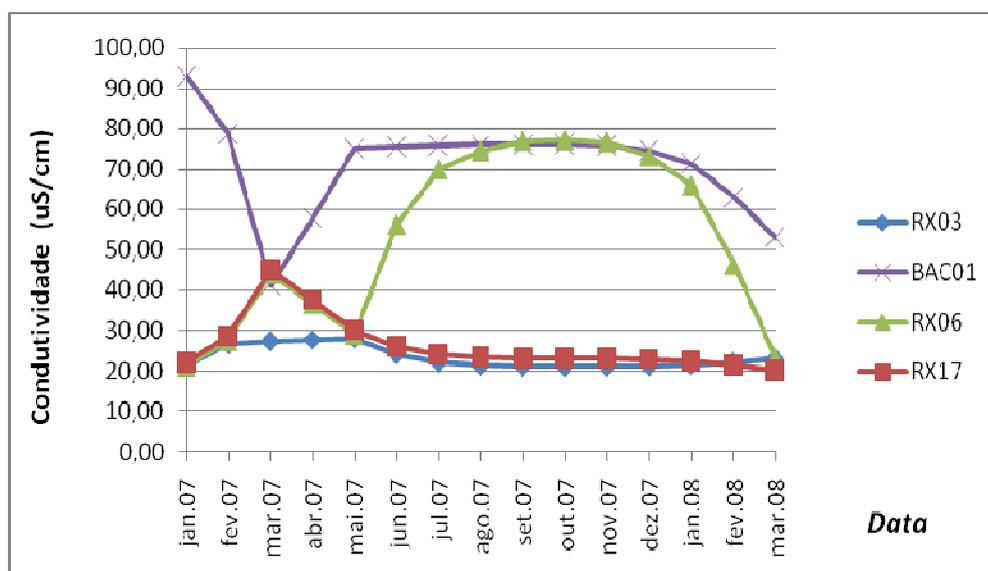
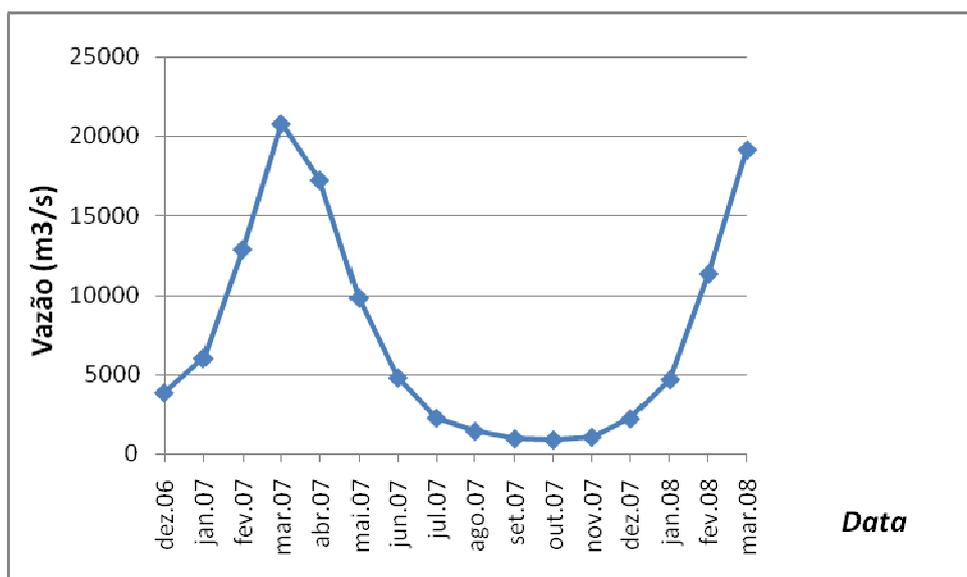


Figura 14: Condutividade (uS/cm) no Trecho de Vazão Reduzida.



**Figura 15:** Curva de Vazão (m<sup>3</sup>/s) no Trecho de Vazão Reduzida.

#### 4.3.1.1 Discussão

A redução das vazões não determinará alterações quantitativas elevadas nos compartimentos 1 e 2. Haverá aumento de condutividade a jusante do Rio Bacajá como já foi demonstrado pelo estudo de outras variáveis. A questão que se coloca é se este aumento é significativo para a vida aquática à jusante deste rio e nos compartimentos 3 e 4. O atual sistema dilui consideravelmente a água do Rio Bacajá tanto que a condutividade ( $\mu\text{s/cm}$ ) no ponto RX17 a jusante já apresenta valores bem mais baixos.

O ligeiro aumento de condutividade no ponto RX06 (Rio Bacajá) com a diminuição da vazão não deve ter grandes conseqüências na vida aquática. A tolerância dos organismos aquáticos à condutividade varia em função das estratégias de balanço osmótico e equilíbrio iônico de diferentes organismos. Entretanto, as variações de condutividade que ocorrem nessa região (entre aproximadamente 21  $\mu\text{s/cm}$  e aproximadamente 82  $\mu\text{s/cm}$ ) não devem produzir maiores danos a espécies aquáticas. Organismos que toleram variações de condutividade estão localizados em um determinado gradiente. Este gradiente pode ser considerado como:

- 0  $\mu\text{s/cm}$  a 100  $\mu\text{s/cm}$
- 100-200  $\mu\text{s/cm}$  a 200-250  $\mu\text{s/cm}$
- > 250  $\mu\text{s/cm}$

Segundo Lokwood (1973) e Falf (2001).

Este gradiente é válido para muitas espécies de invertebrados aquáticos, vertebrados (especialmente peixes) e plantas aquáticas (algas e macrófitas aquáticas). Portanto, a variação de condutividade apresentada não afetará a diversidade de espécies aquáticas dos vários compartimentos.

Verifica-se que a alteração da vazão de 5.822 m<sup>3</sup>/s (Maio 2007) para 4.789 m<sup>3</sup>/s (Junho 2007) promoveu um aumento considerável da condutividade no ponto RX06 como resultado do efeito do Rio Bacajá (Figura 10). Mesmo duplicando a condutividade ainda assim não há dano à vida aquática pelas razões acima expostas.

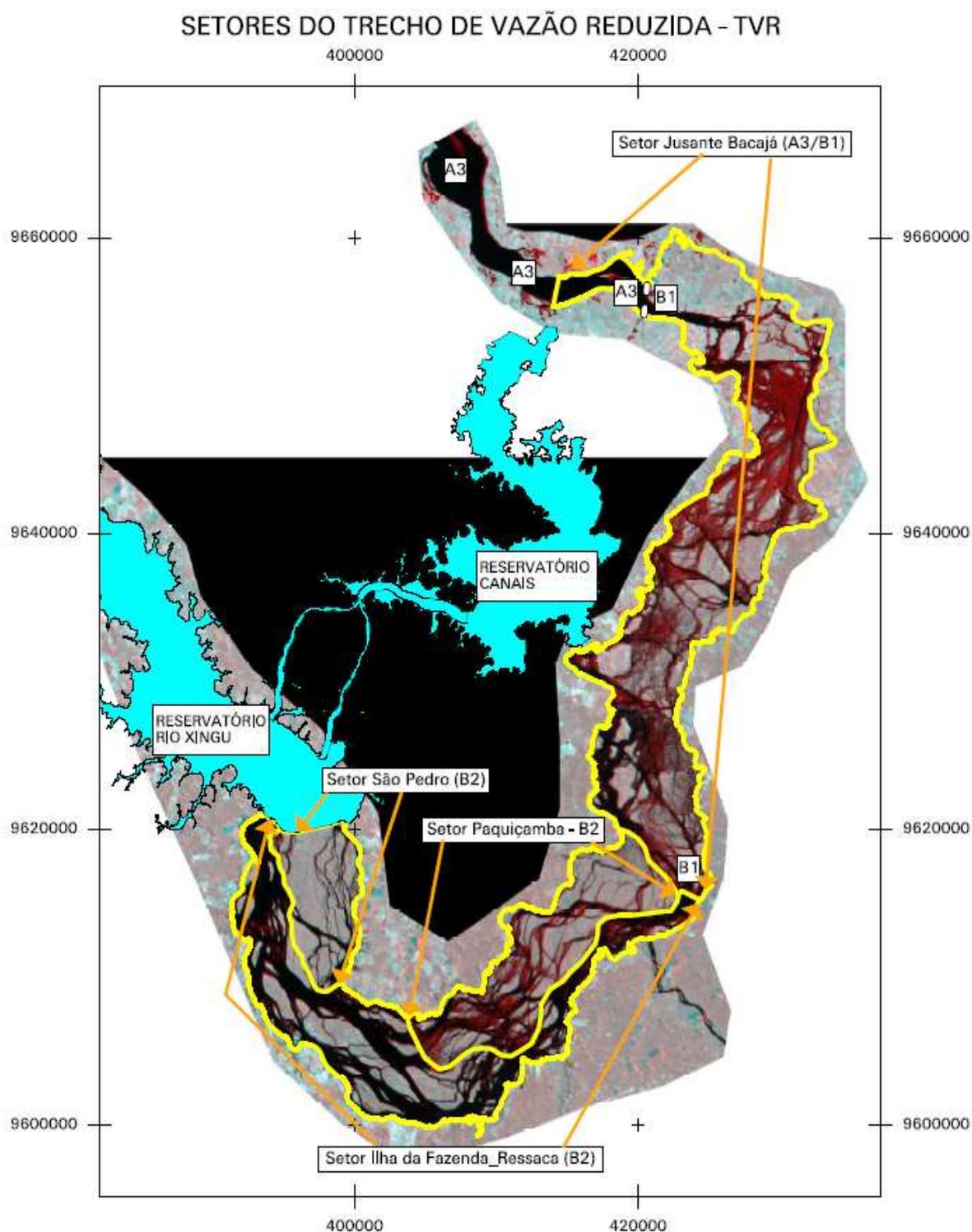
### 4.3.2 Compartimentalização do Trecho Vazão Reduzida

Utilizando-se os resultados obtidos na modelagem do MQUAL acoplado com o Índice de Estado Trófico (IET), e fazendo um estudo utilizando-se das séries históricas de vazões, e dos dados obtidos sobre a qualidade da água nas quatro campanhas realizadas neste ano, simulou-se e determinou-se a vazão mais favorável para a manutenção da qualidade da água no Trecho de Vazão Reduzida.

Para um melhor estudo, da qualidade da água, esse trecho foi compartimentado, e em cada compartimento foram tomados pontos, de coleta de dados, onde foram feitas simulações para a quantidade de fósforo total, nitrogênio total, condutividade e saturação de oxigênio na água, para as épocas de estiagem e vazante.

Foram tomados 4 compartimentos (Figura 16):

1. Compartimento São Pedro;
2. Compartimento Ilha da Fazenda / Ressaca;
3. Compartimento Paquiçamba;
4. Compartimento a Jusante do Bacajá.



**Figura 16.** Mapa dos Compartimentos do Trecho de Vazão Reduzida.

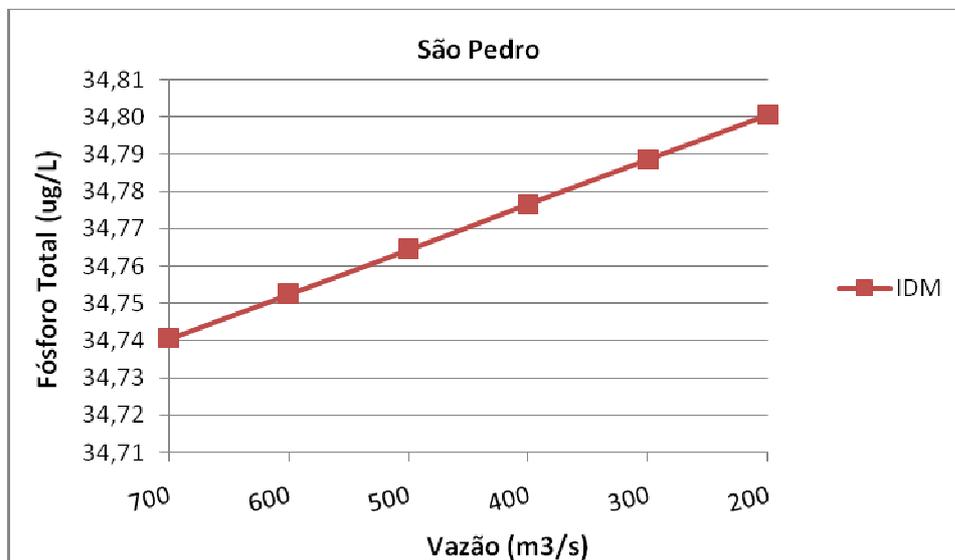
• **Compartimento São Pedro:**

Setor: São Pedro;

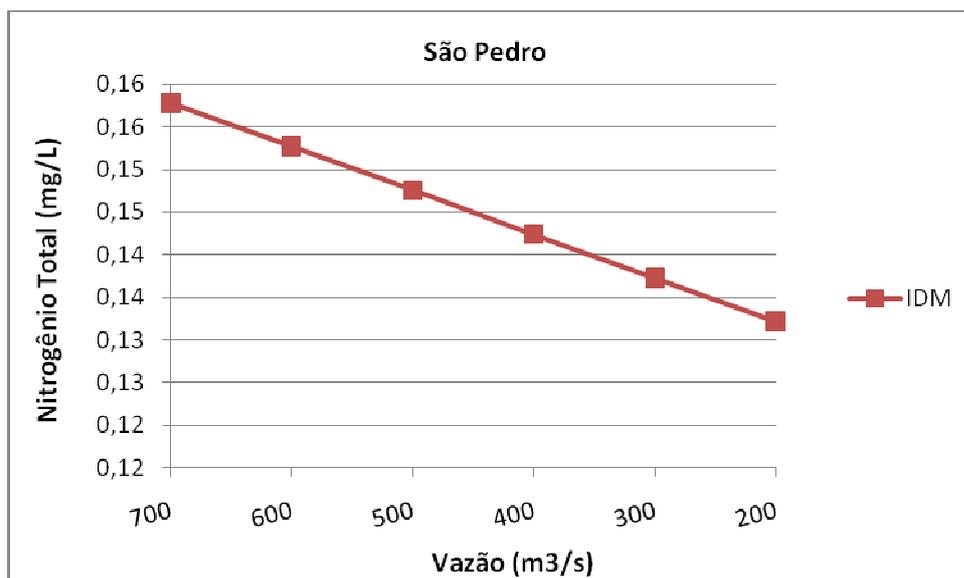
Pontos: IDM.

○ Estiagem:

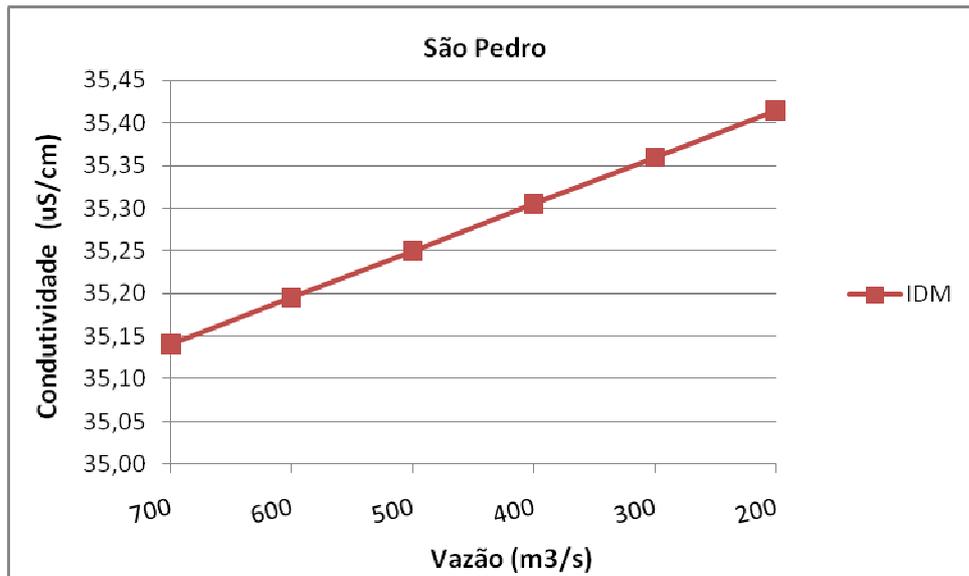
Nas Figuras de 17 até 20 estão respectivamente apresentados os dados de fósforo total, nitrogênio total, condutividade e saturação de oxigênio para a época de estiagem no compartimento São Pedro no Trecho de Vazão Reduzida. Observa-se que com a diminuição da vazão ocorre um aumento nos índices de Fósforo Total e Condutividade, e uma diminuição nos índices de Nitrogênio Total e Saturação de O<sub>2</sub>.



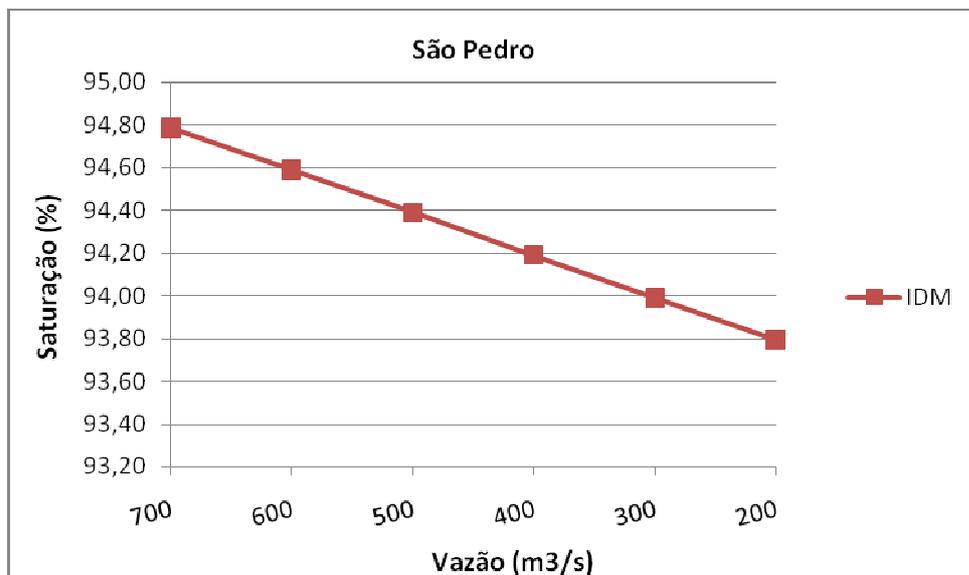
**Figura 17:** Fósforo Total (ug/L) na Estiagem no Compartimento São Pedro.



**Figura 18:** Nitrogênio Total (mg/L) na Estiagem no Compartimento São Pedro.



**Figura 19:** Condutividade (uS/cm) na Estiagem no Compartimento São Pedro.



**Figura 20:** Saturação de O<sub>2</sub> (%) na Estiagem no Compartimento São Pedro.

- Vazante:

Nas Figuras de 21 até 24 estão respectivamente apresentados os dados de fósforo total, nitrogênio total, condutividade e saturação de oxigênio para a época de vazante no compartimento São Pedro no Trecho de Vazão Reduzida. Observa-se que com o aumento da vazão ocorre uma diminuição nos índices de Fósforo Total e Condutividade, e um aumento nos índices de Nitrogênio Total e Saturação de O<sub>2</sub>.

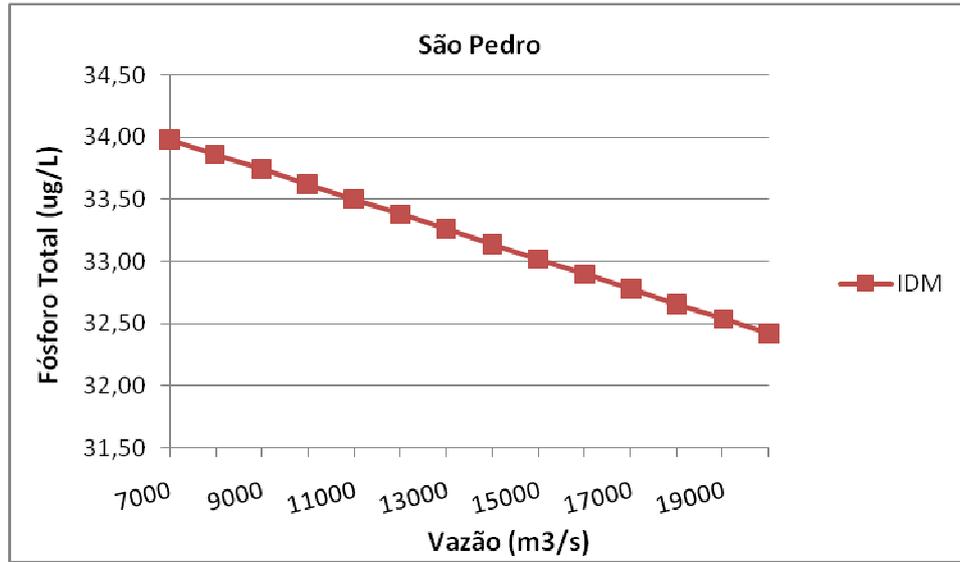


Figura 21: Fósforo Total (ug/L) na Vazante no Compartimento São Pedro.

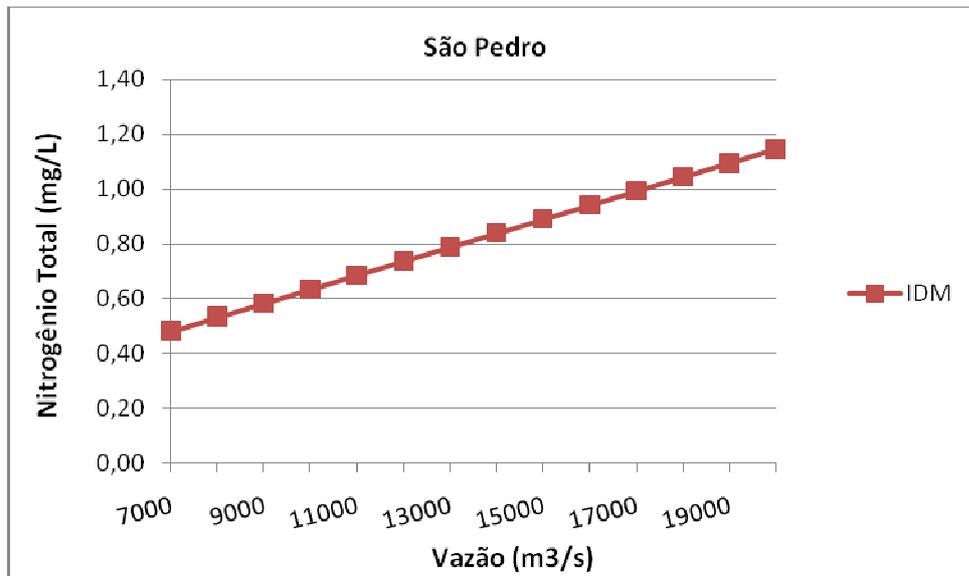
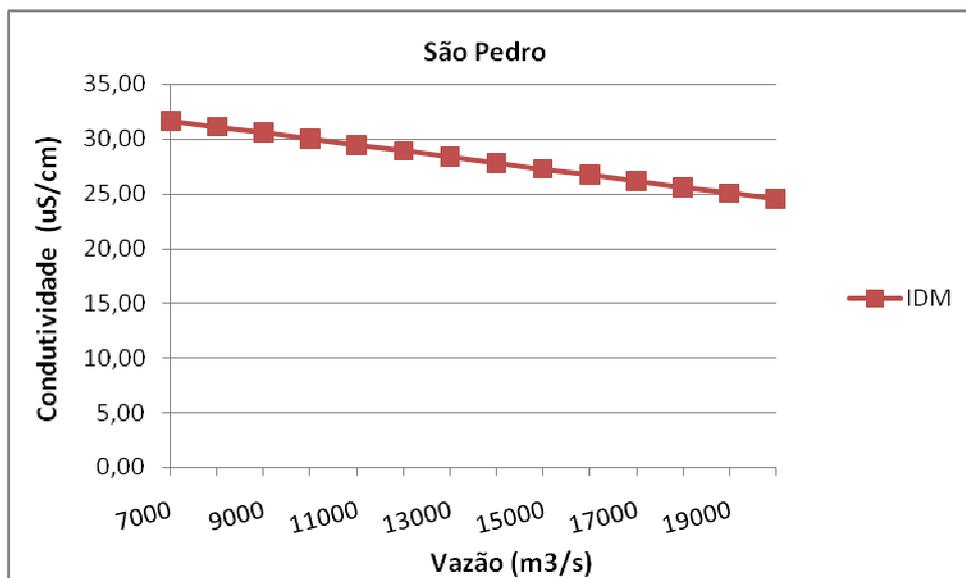
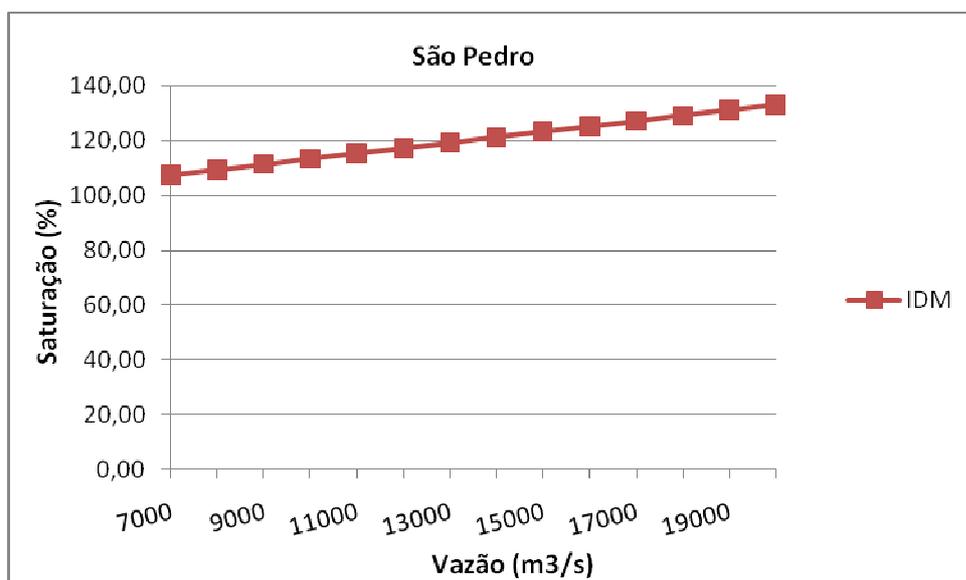


Figura 22: Nitrogênio Total (mg/L) na Vazante no Compartimento São Pedro.



**Figura 23:** Condutividade (uS/cm) na Vazante no Compartimento São Pedro.



**Figura 24:** Saturação de O<sub>2</sub> (%) na Vazante no Compartimento São Pedro.

• **Compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca:**

Setor: Ilha da Fazenda/Ressaca;  
Pontos: RX04 e RX05.

- Estiagem:

Nas Figuras de 25 até 28 estão respectivamente apresentados os dados de fósforo total, nitrogênio total, condutividade e saturação de oxigênio para a época de estiagem no compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca no Trecho de Vazão Reduzida. Observa-se que com a diminuição da vazão não ocorre mudanças nos índices de Fósforo Total e Nitrogênio Total, e ocorre uma diminuição nos índices de Condutividade e Saturação de O<sub>2</sub>.

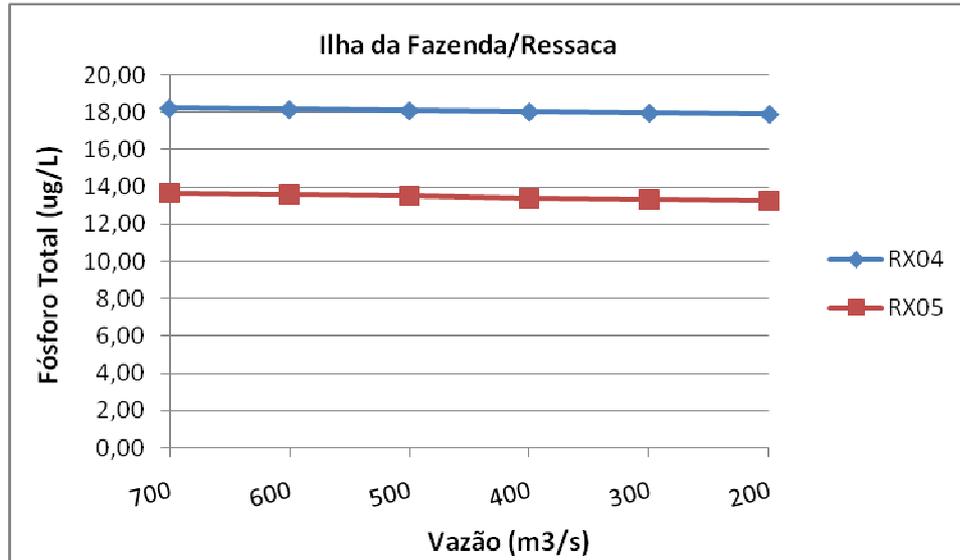


Figura 25: Fósforo Total (ug/L) na Estiagem no Compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca.

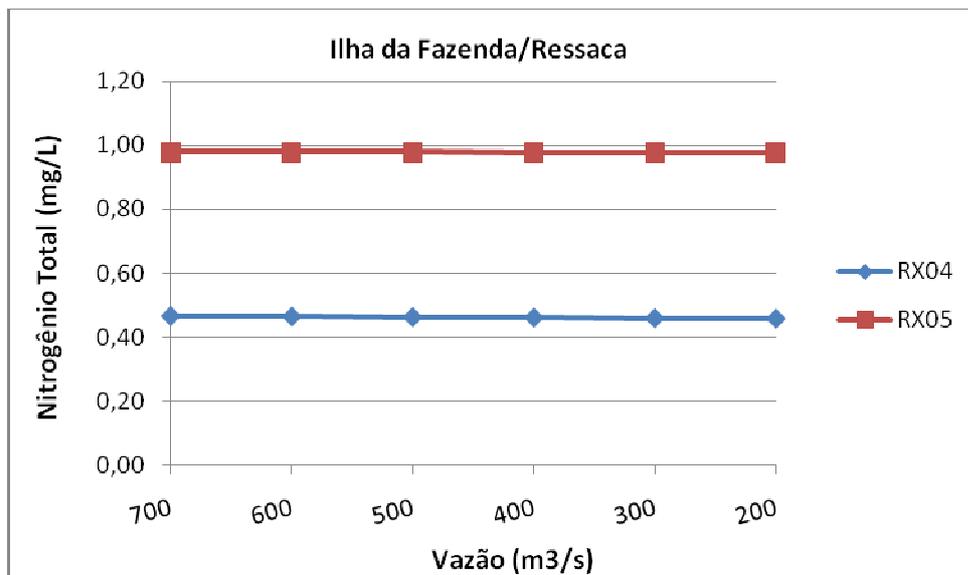
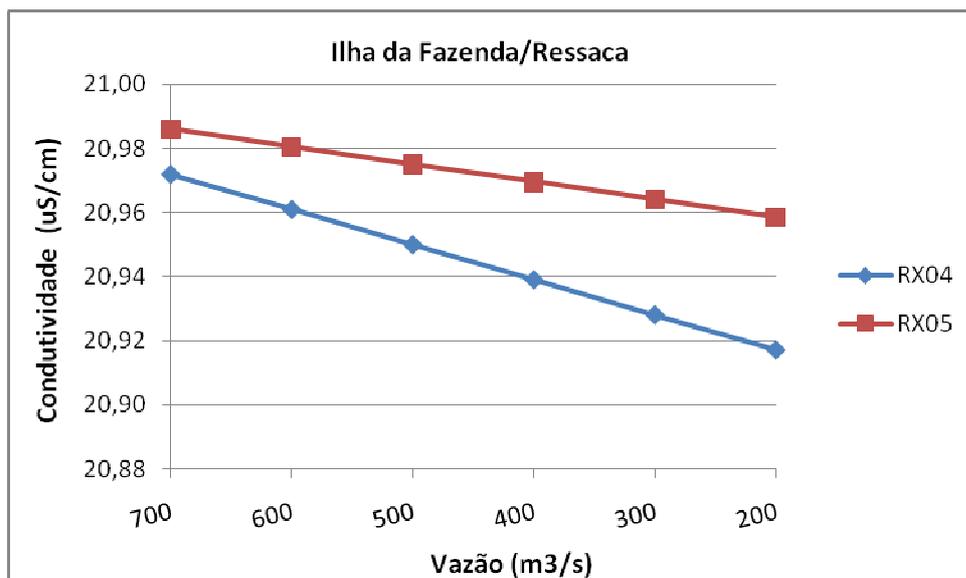
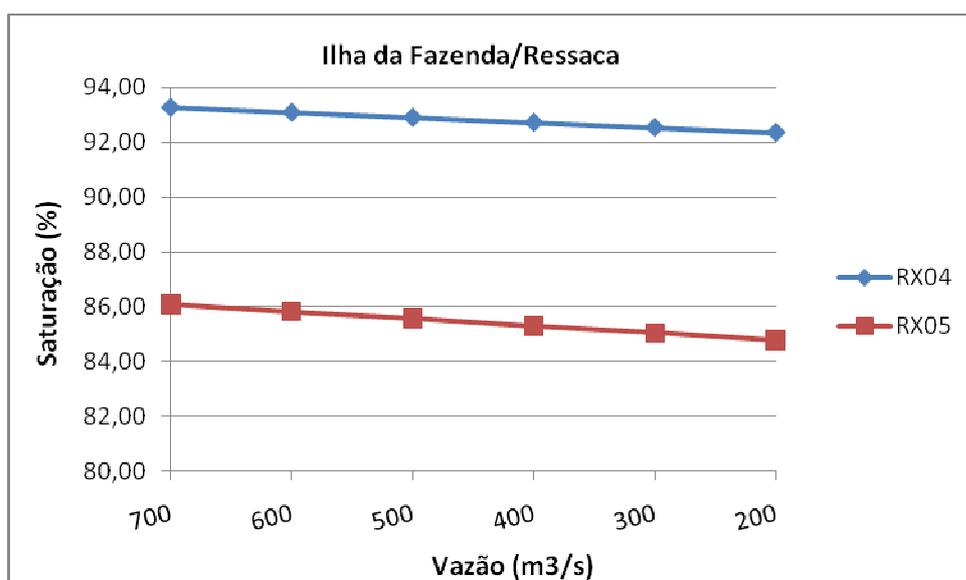


Figura 26: Nitrogênio Total (mg/L) na Estiagem no Compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca.



**Figura 27:** Condutividade (uS/cm) na Estiagem no Compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca.



**Figura 28:** Saturação de O<sub>2</sub> (%) na Estiagem no Compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca.

o Vazante:

Nas Figuras de 29 até 32 estão respectivamente apresentados os dados de fósforo total, nitrogênio total, condutividade e saturação de oxigênio para a época de vazante no compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca no Trecho de Vazão Reduzida. Observa-se que com o aumento da vazão ocorre um aumento nos índices de Fósforo Total, Nitrogênio Total e Condutividade, e uma diminuição no índice Saturação de O<sub>2</sub>.

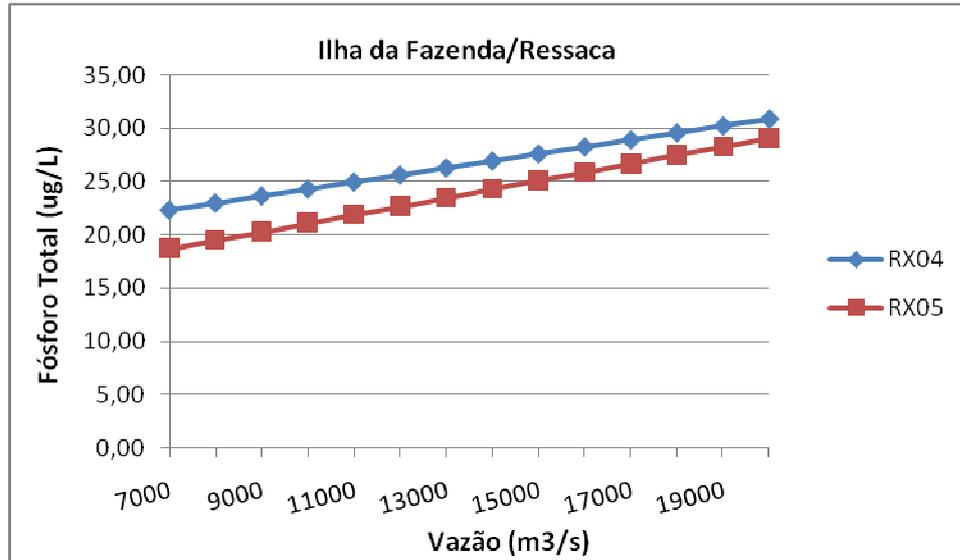


Figura 29: Fósforo Total (ug/L) na Vazante no Compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca.

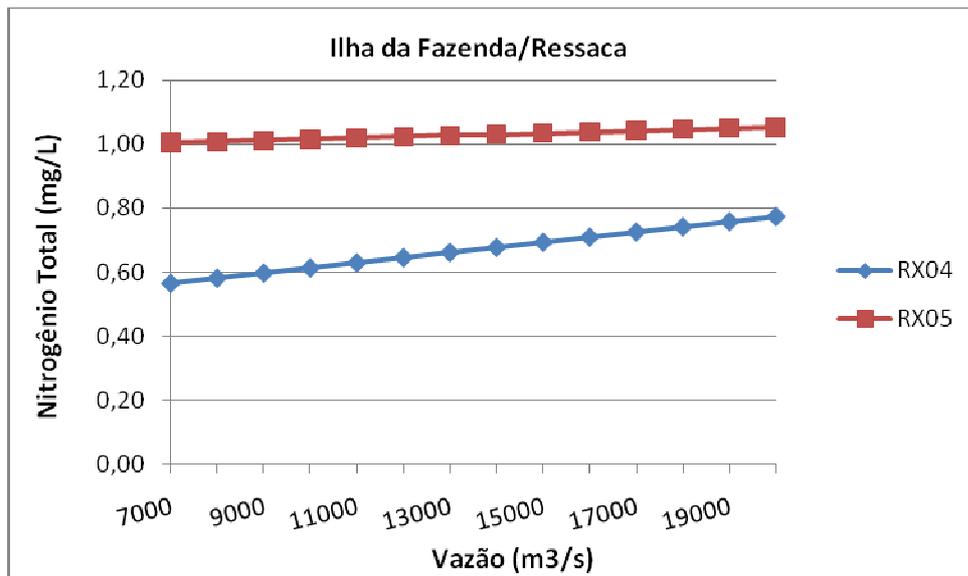


Figura 30: Nitrogênio Total (mg/L) na Vazante no Compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca.

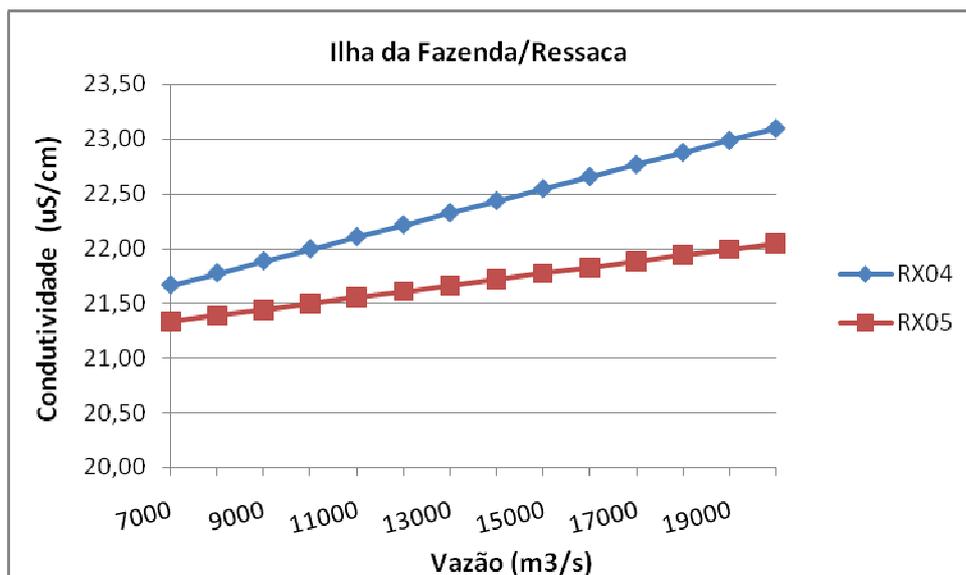


Figura 31: Condutividade (uS/cm) na Vazante no Compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca.

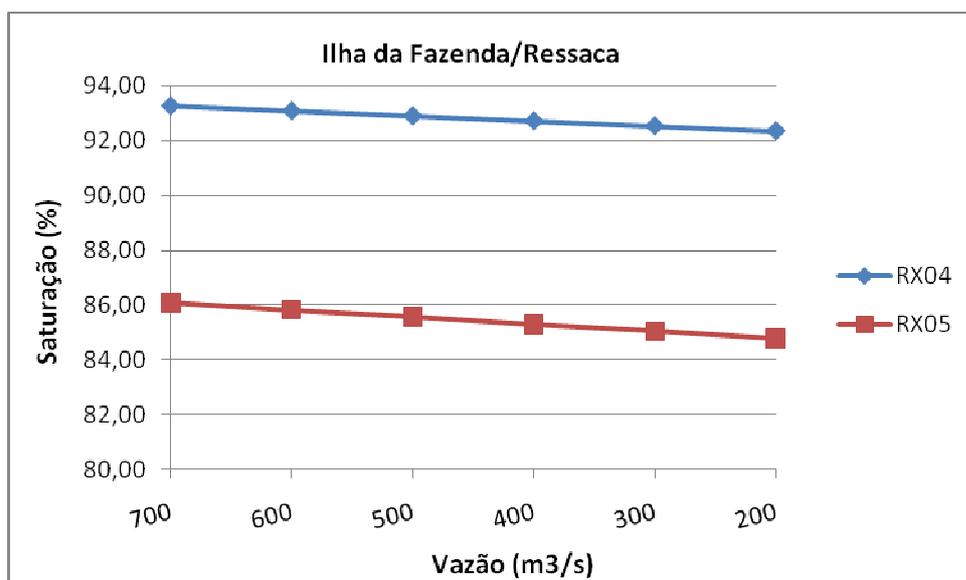


Figura 32: Saturação de O<sub>2</sub> (%) na Vazante no Compartimento Ilha da Fazenda/Ressaca.

• **Compartimento Paquiçamba:**

Setor: Paquiçamba;  
Pontos: RX20.

- Estiagem:

Nas Figuras de 33 até 36 estão respectivamente apresentados os dados de fósforo total, nitrogênio total, condutividade e saturação de oxigênio para a época de estiagem no compartimento Paquiçamba no Trecho de Vazão Reduzida. Observa-se que com a diminuição da vazão ocorre uma diminuição nos índices de Fósforo Total, Nitrogênio Total e Saturação de O<sub>2</sub>, e um aumento no índice de Condutividade.

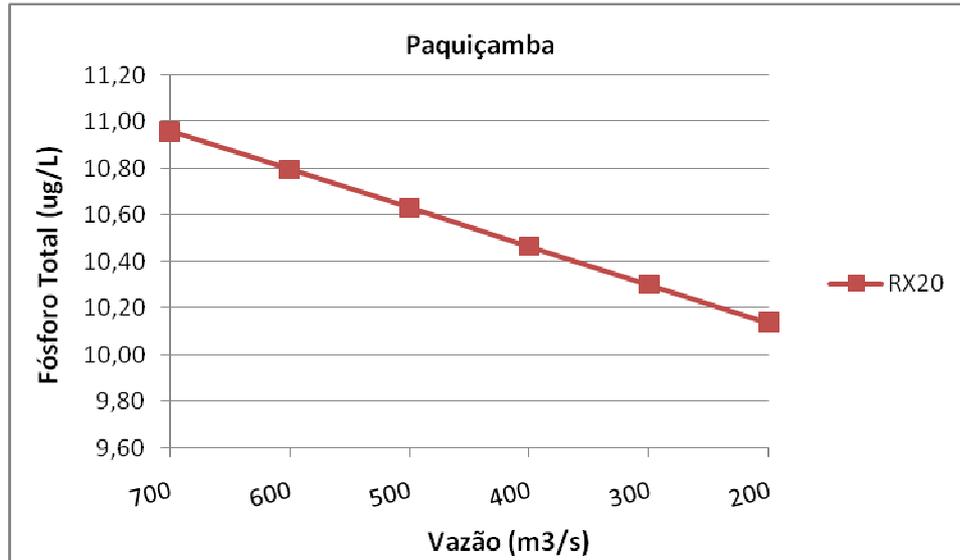


Figura 33: Fósforo Total (ug/L) na Estiagem no Compartimento Paquiçamba.

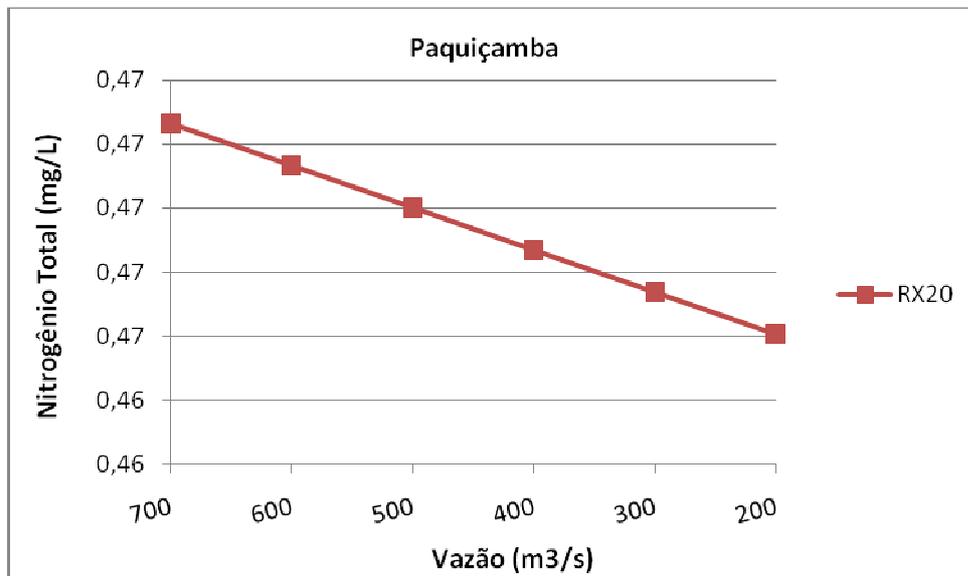
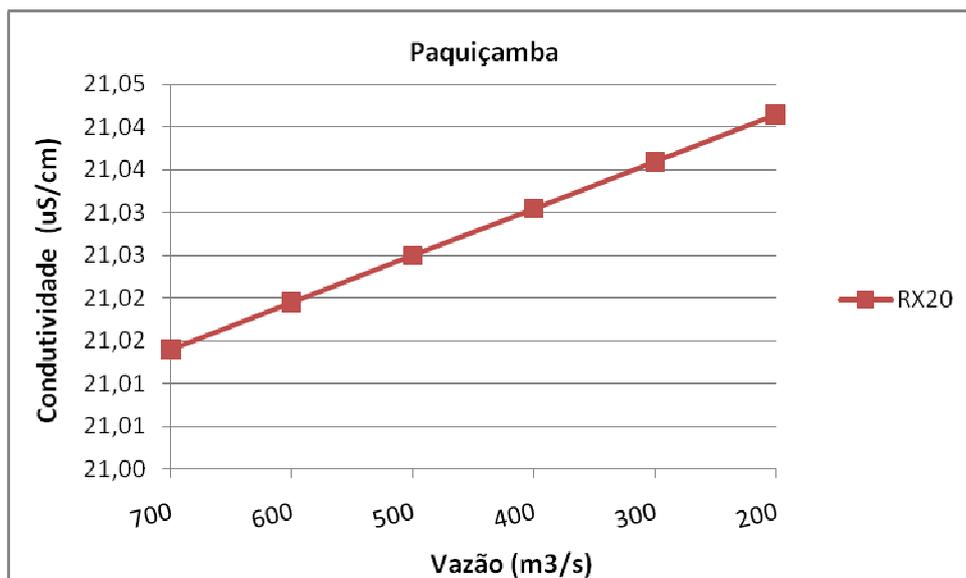
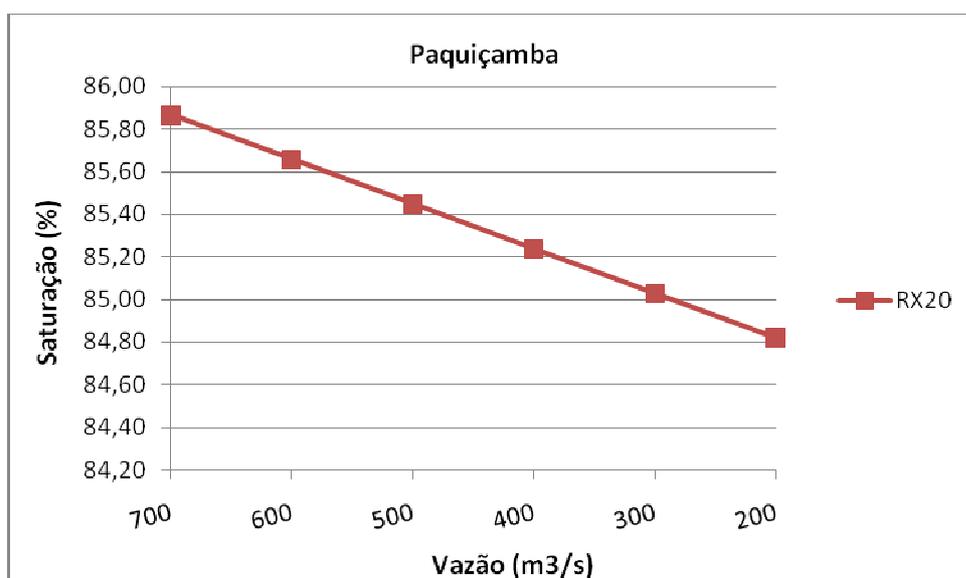


Figura 34: Nitrogênio Total (mg/L) na Estiagem no Compartimento Paquiçamba.



**Figura 35:** Condutividade (uS/cm) na Estiagem no Compartimento Paquiçamba.



**Figura 36:** Saturação de O<sub>2</sub> (%) na Estiagem no Compartimento Paquiçamba.

- Vazante:

Nas Figuras de 37 até 40 estão respectivamente apresentados os dados de fósforo total, nitrogênio total, condutividade e saturação de oxigênio para a época de vazante no compartimento Paquiçamba no Trecho de Vazão Reduzida. Observa-se que com o aumento da vazão ocorre uma diminuição no índice de Condutividade, e um aumento nos índices de Fósforo Total, Nitrogênio Total e Saturação de O<sub>2</sub>.

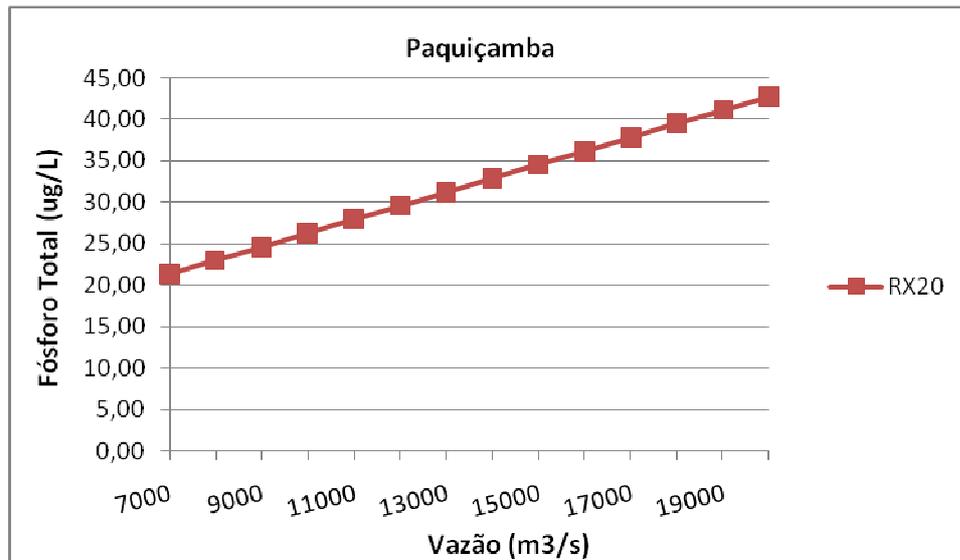


Figura 37: Fósforo Total (ug/L) na Vazante no Compartimento Paquiçamba.

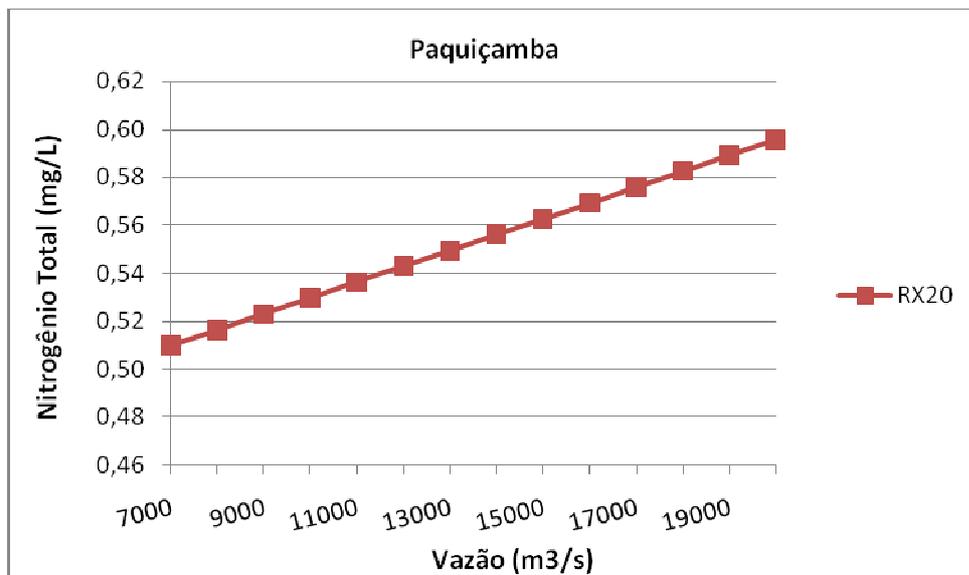


Figura 38: Nitrogênio Total (mg/L) na Vazante no Compartimento Paquiçamba.

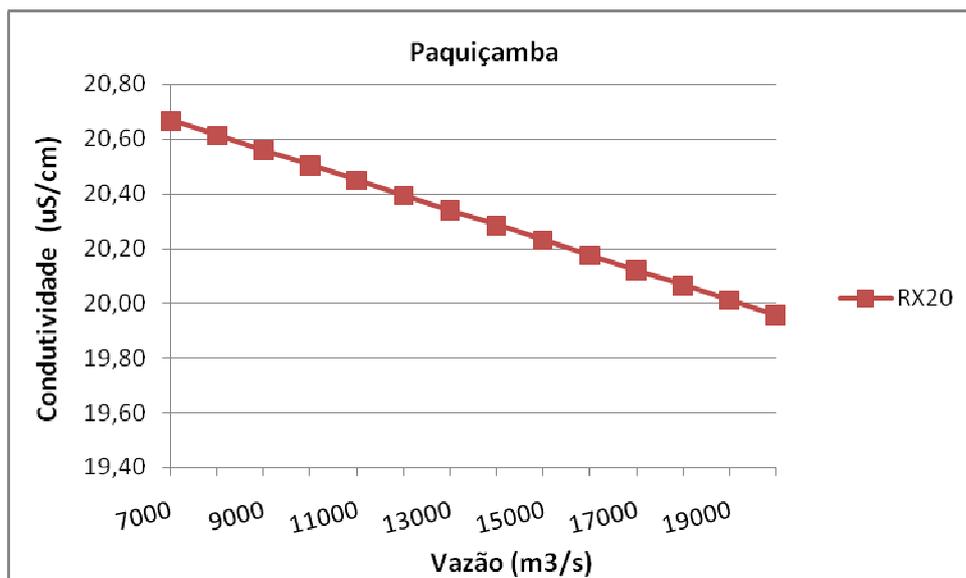


Figura 39: Condutividade (uS/cm) na Vazante no Compartimento Paquiçamba.

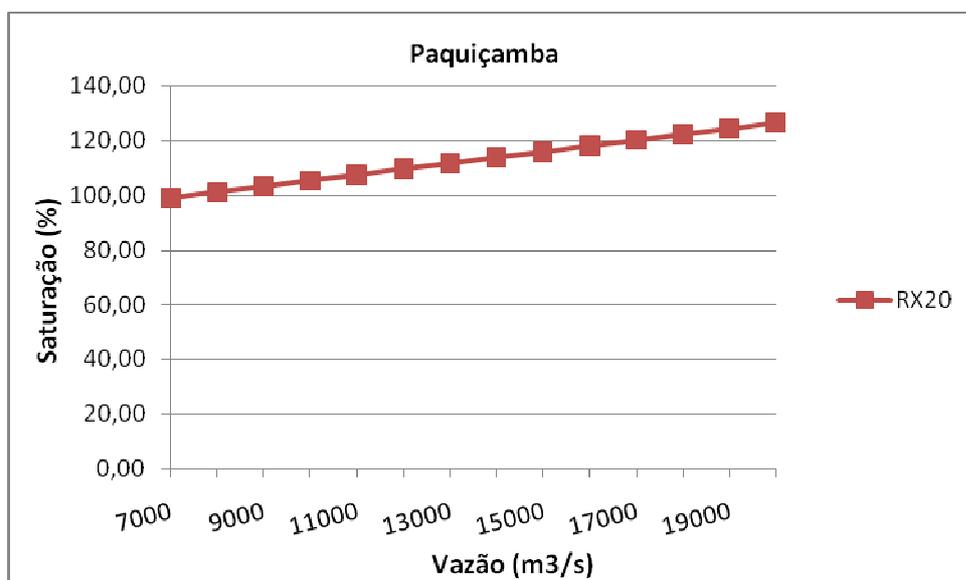


Figura 40: Saturação de O<sub>2</sub> (%) na Vazante no Compartimento Paquiçamba.

• **Compartimento Jusante Bacajá:**

Setor: A Jusante do Rio Bacajá até a AHE Belo Monte;  
Pontos: RX06 e RX17.

Nas Figuras de 41 até 44 estão respectivamente apresentados os dados de fósforo total, nitrogênio total, condutividade e saturação de oxigênio para a época de estiagem no compartimento Jusante Bacajá no Trecho de Vazão Reduzida. Observa-se que com a diminuição da vazão não ocorrem mudanças nos índices de Fósforo Total, Nitrogênio Total, Condutividade e Saturação de O<sub>2</sub>.

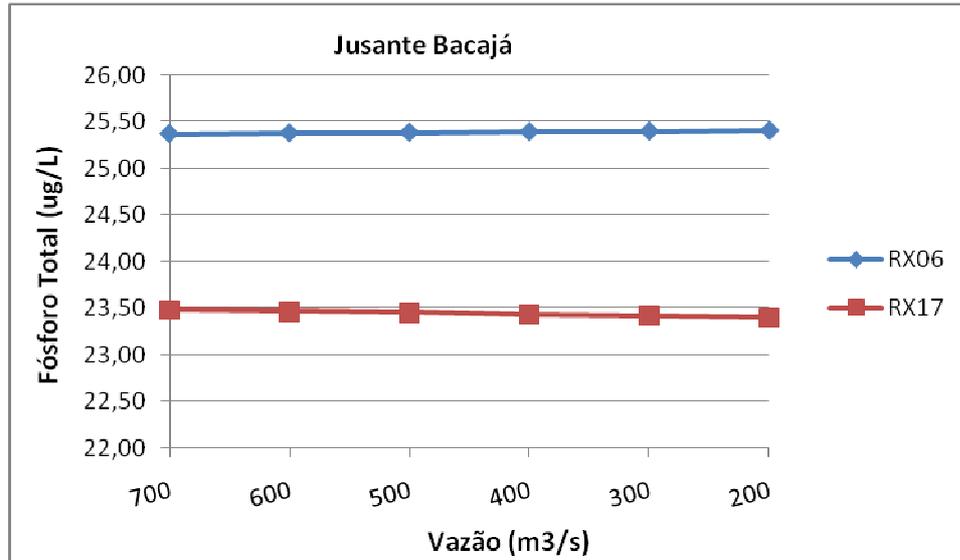


Figura 41: Fósforo Total (ug/L) na Estiagem no Compartimento Jusante Bacajá.

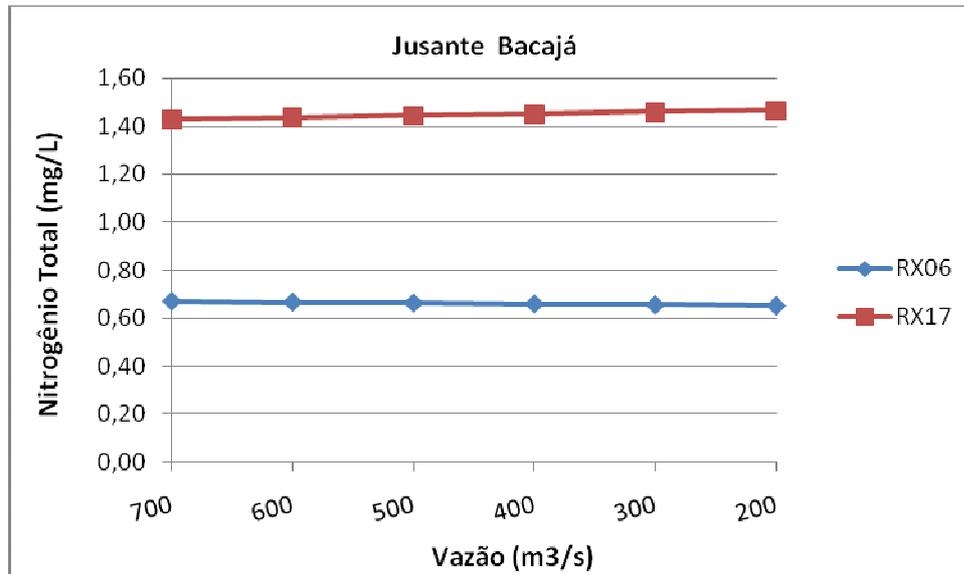
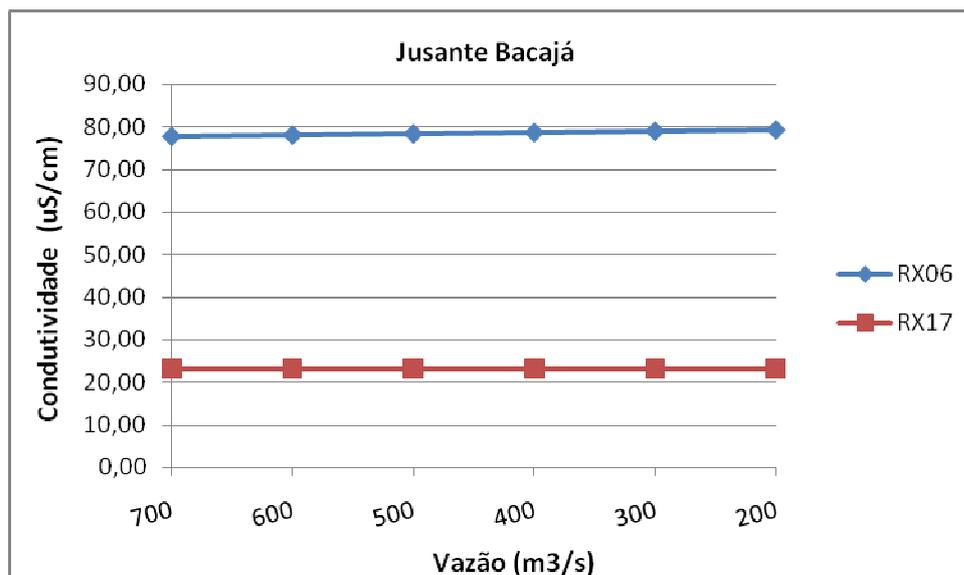
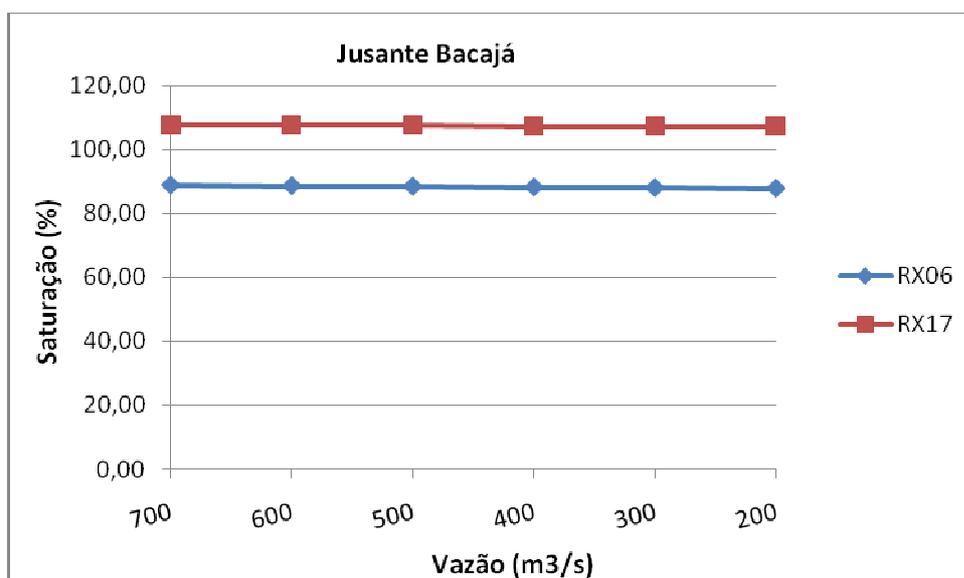


Figura 42: Nitrogênio Total (mg/L) na Estiagem no Compartimento Jusante Bacajá.



**Figura 43:** Condutividade (uS/cm) na Estiagem no Compartimento Jusante Bacajá.



**Figura 44:** Saturação de O<sub>2</sub> (%) na Estiagem no Compartimento Jusante Bacajá.

o Vazante:

Nas Figuras de 45 até 48 estão respectivamente apresentados os dados de fósforo total, nitrogênio total, condutividade e saturação de oxigênio para a época de vazante no compartimento Jusante Bacajá no Trecho de Vazão Reduzida. Observa-se que com o aumento da vazão os pontos desse compartimento variam de maneira diferentes. No ponto RX06 há uma diminuição dos índices de Fósforo Total e Condutividade e um aumento nos índices de Nitrogênio Total e Saturação de O<sub>2</sub>, já no ponto RX17 há um aumento no índice de Fósforo Total, uma diminuição no índice de Nitrogênio Total e os índices de Condutividade e Saturação de O<sub>2</sub> permanecem inalterados.

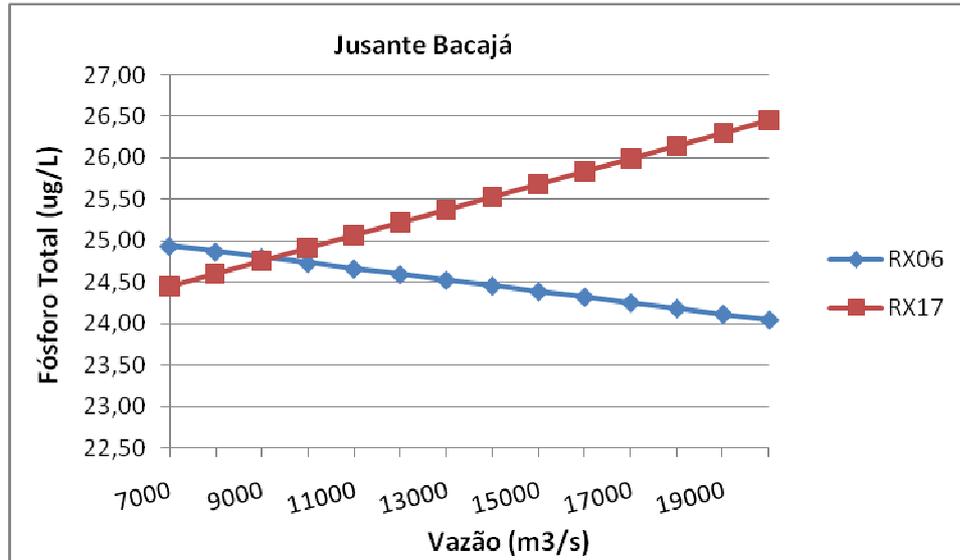


Figura 45: Fósforo Total (ug/L) na Vazante no Compartimento Jusante Bacajá.

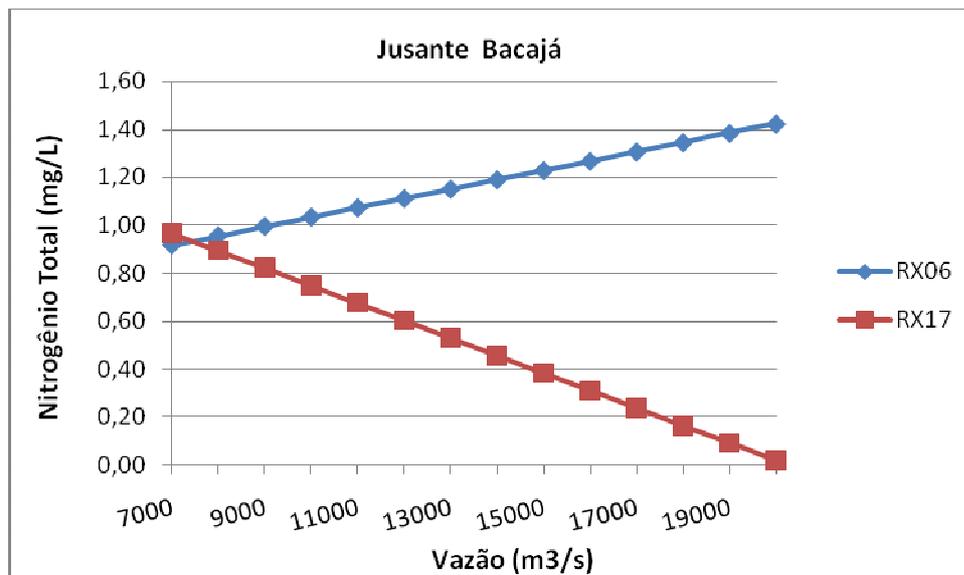


Figura 46: Nitrogênio Total (mg/L) na Vazante no Compartimento Jusante Bacajá.

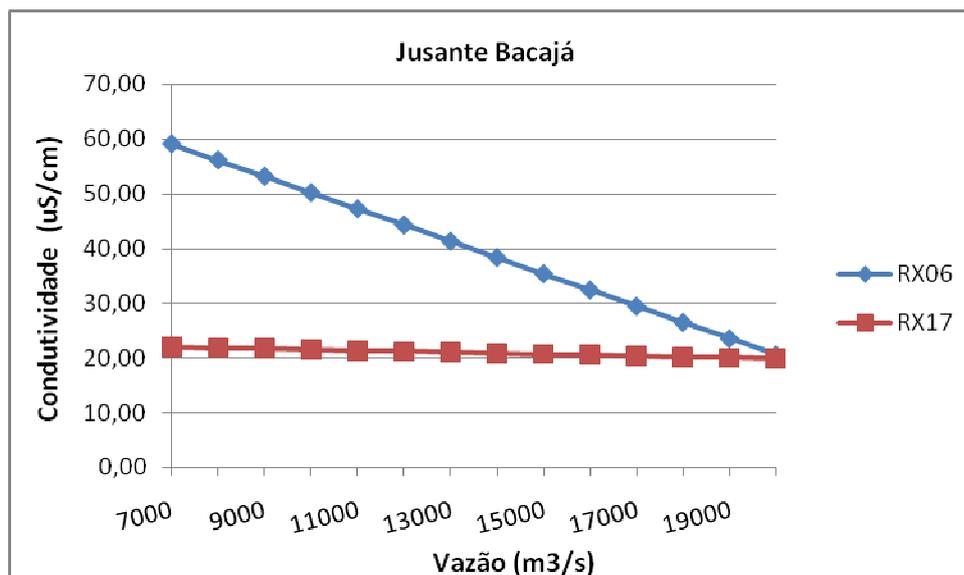


Figura 47: Condutividade (uS/cm) na Vazante no Compartimento Jusante Bacajá.

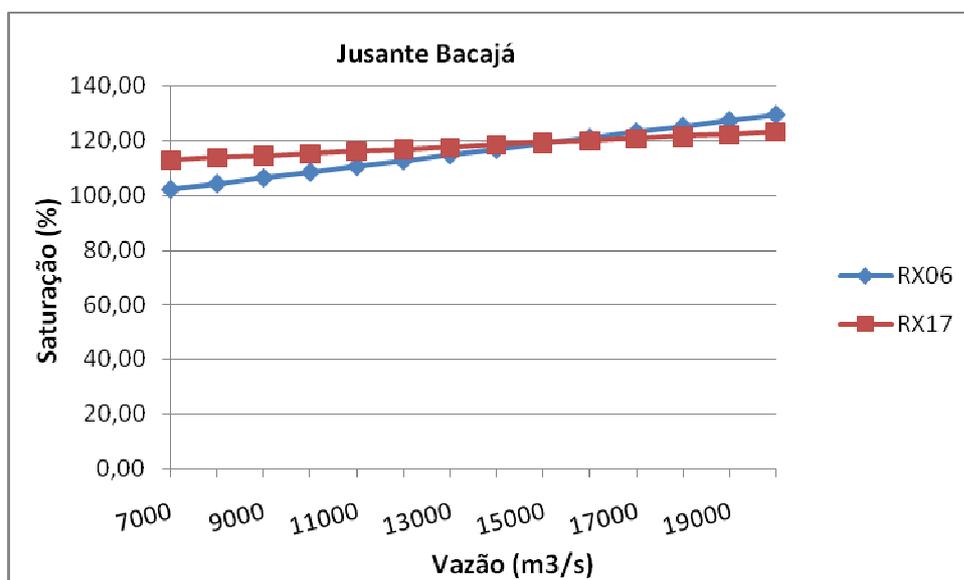


Figura 48: Saturação de O<sub>2</sub> (%) na Vazante no Compartimento Jusante Bacajá.

#### 4.4 Simulação a Jusante da Casa de Força

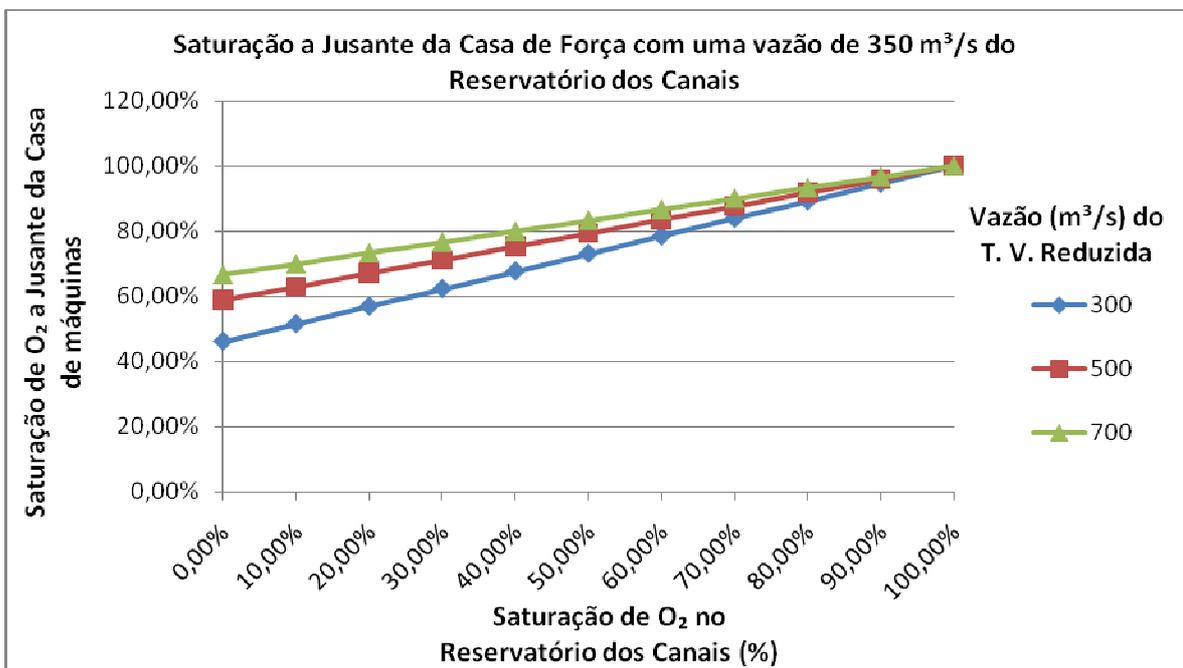
Simulação da saturação de O<sub>2</sub> a jusante da Casa de Força, com várias saturações de O<sub>2</sub> nos reservatórios dos canais e com diferentes diluições. Foram utilizados os resultados obtidos para a saturação de O<sub>2</sub> na modelagem a Jusante do Reservatório Pricipal, associados com uma série de possibilidades de saturações do Reservatório dos Canais.

De acordo com a modelagem no Trecho de Vazão Reduzida, assumimos que a saturação de O<sub>2</sub> nesse trecho é de 100%, nas figuras de 45 à 50 foram feitas várias simulações com diferentes vazões para os dois trechos e variando a saturação de O<sub>2</sub> da água do Reservatório dos Canais.

Analisando os gráficos, podemos afirmar que quanto maior for a vazão do reservatório dos canais, pior será a qualidade da água no trecho a jusante da casa de força, isso se dá devido ao grande tempo de retenção desse reservatório.

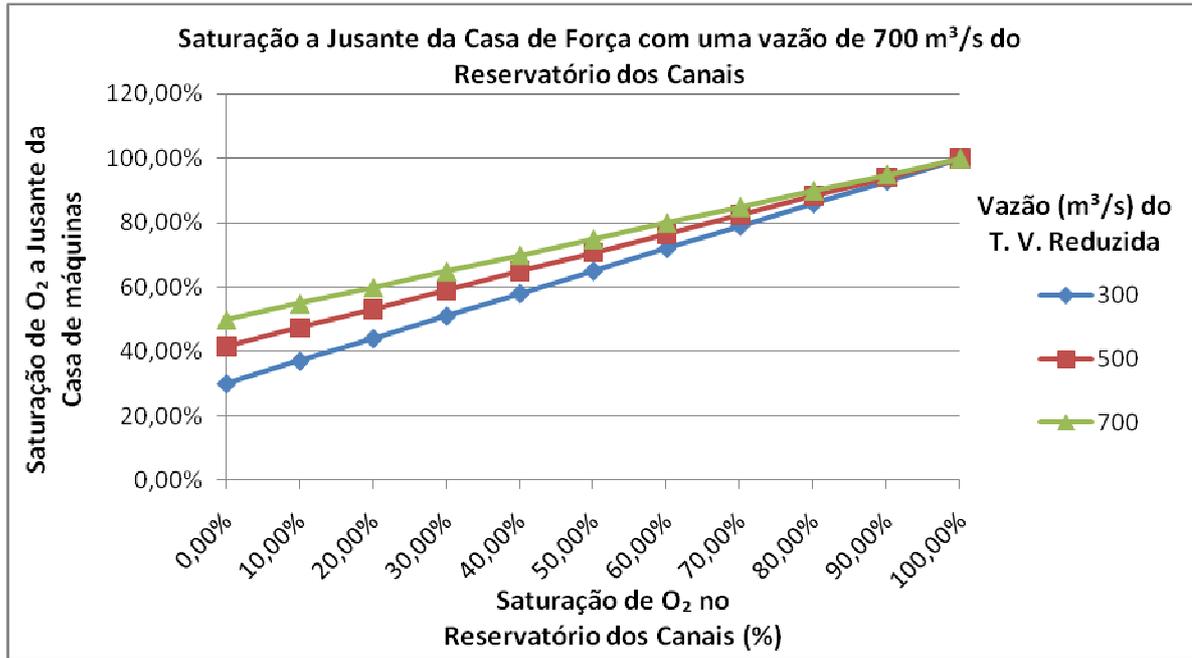
Nas Figuras de 45 à 47 temos uma simulação para o período de alta vazão, onde o ideal para o reservatório principal seria ter uma saturação de O<sub>2</sub> mínima de 80%; já nas figuras de 48 à 50 temos uma simulação para o período de baixa vazão, nesse caso o ideal seria ter uma saturação de O<sub>2</sub> mínima de 85%.

- Figura 49:
  - Vazão do Reservatório dos Canais : 350 m<sup>3</sup>/s;
  - Vazão do Rio Xingu no Trecho de Vazão Reduzida:
    - 300 m<sup>3</sup>/s;
    - 500 m<sup>3</sup>/s;
    - 700 m<sup>3</sup>/s;



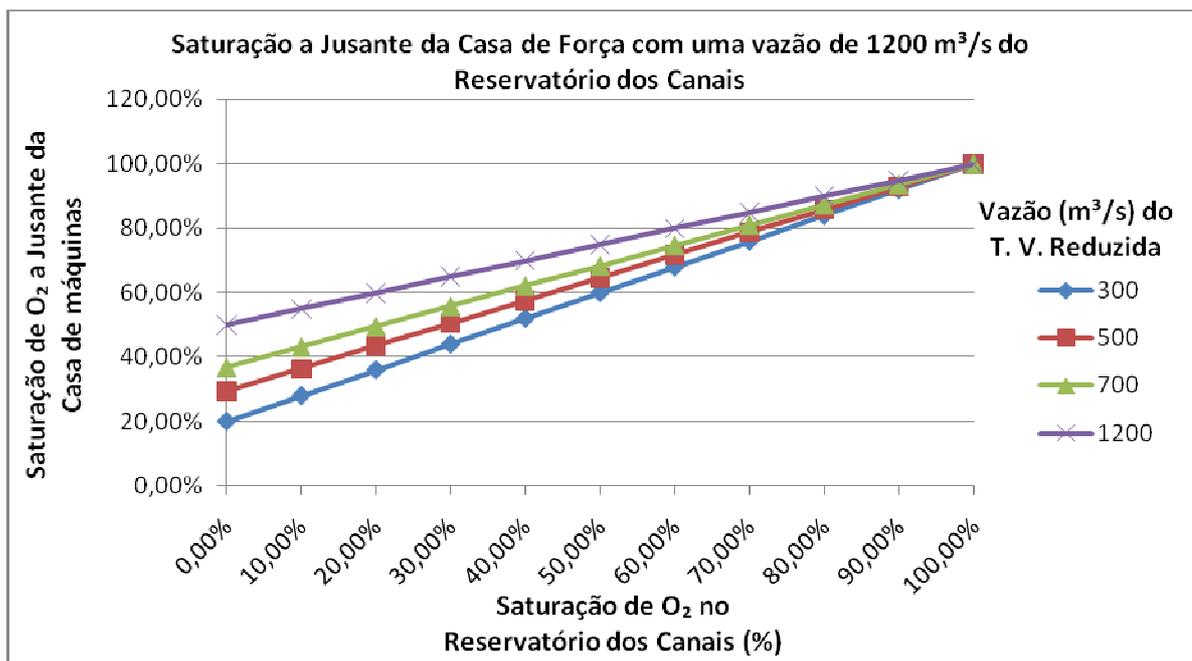
**Figura 49:** Saturação de O<sub>2</sub> (%) a Jusante da Casa de Força.

- Figura 50:
  - Vazão do Reservatório dos Canais : 350 m<sup>3</sup>/s;
  - Vazão do Rio Xingu no Trecho de Vazão Reduzida:
    - 300 m<sup>3</sup>/s;
    - 500 m<sup>3</sup>/s;
    - 700 m<sup>3</sup>/s;



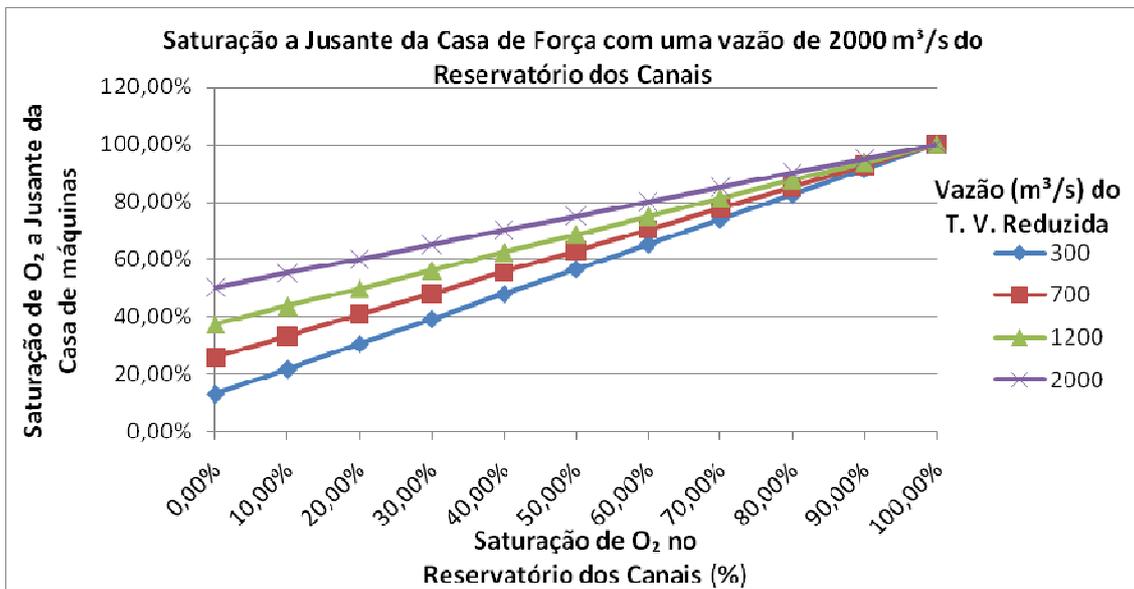
**Figura 50:** Saturação de O<sub>2</sub> (%) a Jusante da Casa de Força.

- Figura 51:
  - Vazão do Reservatório dos Canais : 1200 m<sup>3</sup>/s;
  - Vazão do Rio Xingu no Trecho de Vazão Reduzida:
    - 300 m<sup>3</sup>/s;
    - 500 m<sup>3</sup>/s;
    - 700 m<sup>3</sup>/s;
    - 1200 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 51:** Saturação de O<sub>2</sub> (%) a Jusante da Casa de Força.

- Figura 52:
  - Vazão do Reservatório dos Canais : 2000 m<sup>3</sup>/s;
  - Vazão do Rio Xingu no Trecho de Vazão Reduzida:
    - 300 m<sup>3</sup>/s
    - 700 m<sup>3</sup>/s
    - 1200 m<sup>3</sup>/s
    - 2000 m<sup>3</sup>/s



**Figura 52:** Saturação de O<sub>2</sub> (%) a Jusante da Casa de Força.

Nas Figuras de 53 à 55 pode-se analisar a distância necessária para que os efeitos da água do Reservatório dos Canais seja diluída no Trecho a jusante da Casa de Força. Para esta simulação foi usado o modelo de Streeter – Phelps, que é baseado na seguinte equação:

$$D_t = \frac{k_1}{k_2 - k_1} \left( 10^{-k_1 \cdot t} - 10^{-k_2 \cdot t} \right) + D_a 10^{-k_2 \cdot t}$$

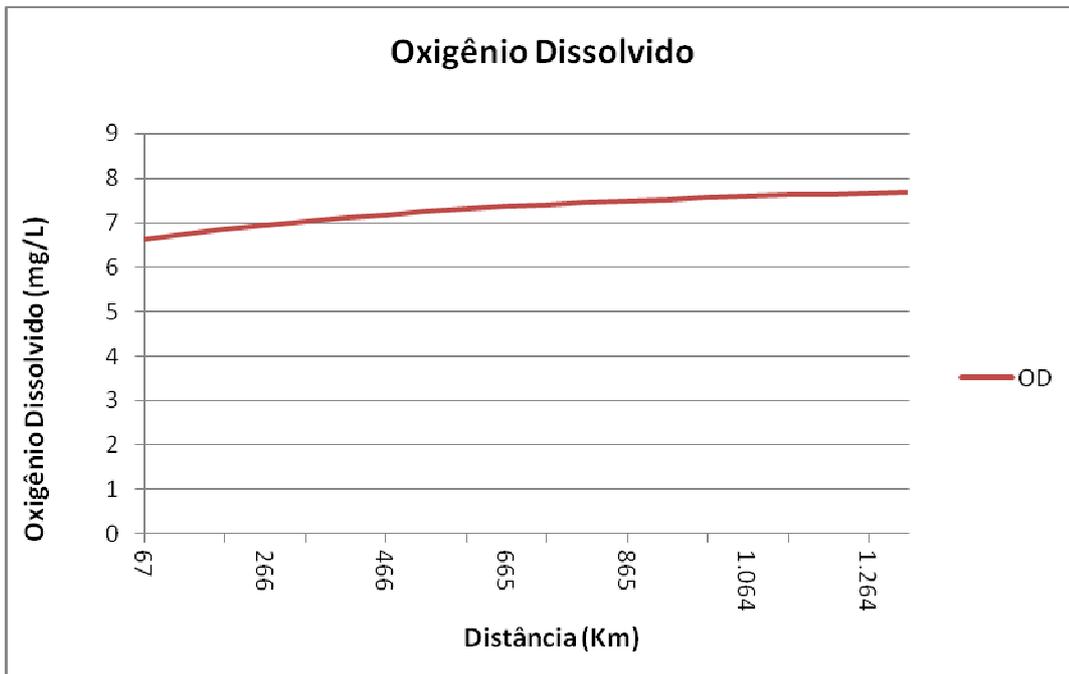
Onde:

- D<sub>t</sub>: deficit de oxigênio dissolvido, em relação à saturação, nos diversos instantes t, em mg/L.
- k<sub>1</sub>: coeficiente de desoxigenação, em d<sup>-1</sup>
- k<sub>2</sub>: coeficiente de reaeração, em d<sup>-1</sup>
- L<sub>a</sub>: DBO total de 1<sup>o</sup> estágio das águas do rio, imediatamente após a mistura com os esgotos, em mg/L.

- $D_a$ : deficit inicial de oxigênio dissolvido, isto é, deficit de oxigênio no ponto de lançamento da água do Reservatório dos Canais, em relação à saturação, em mg/L.
- t: tempo, em dias

- Figura 53:

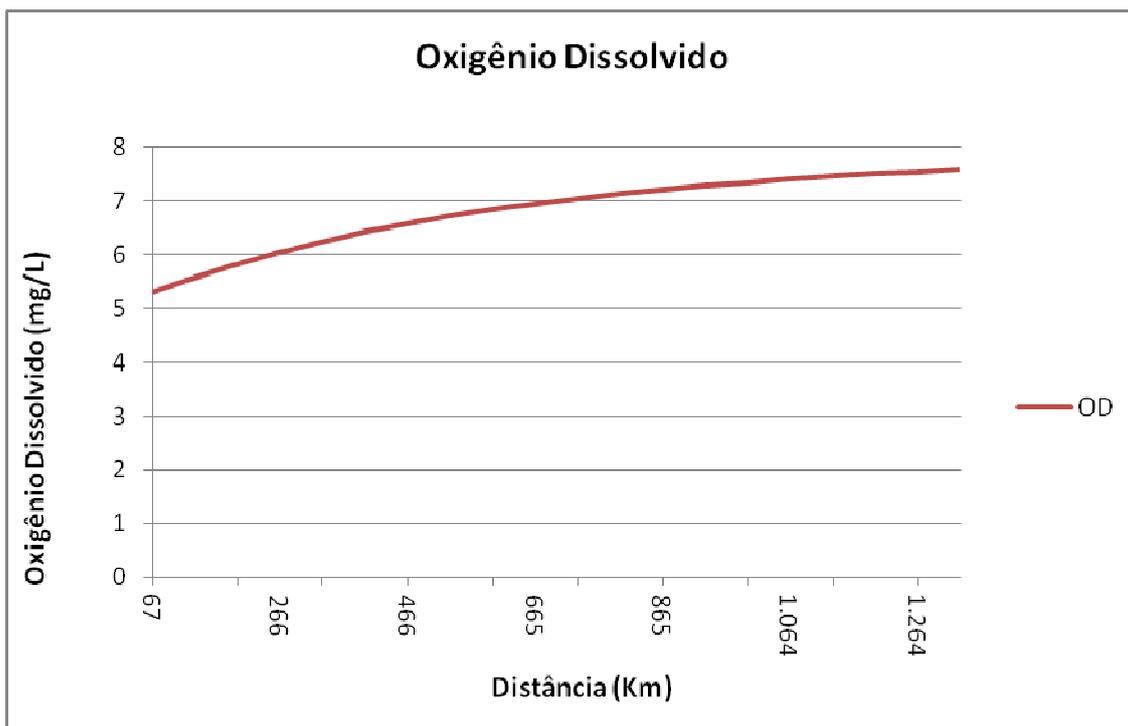
- Oxigênio Dissolvido do Reservatório dos Canais : 6,0 mg/L;
- Oxigênio Dissolvido do Rio Xingu no Trecho de Vazão Reduzida: 8,0mg/L.



**Figura 53:** Oxigênio Dissolvido (mg/L) por distância de diluição (Km).

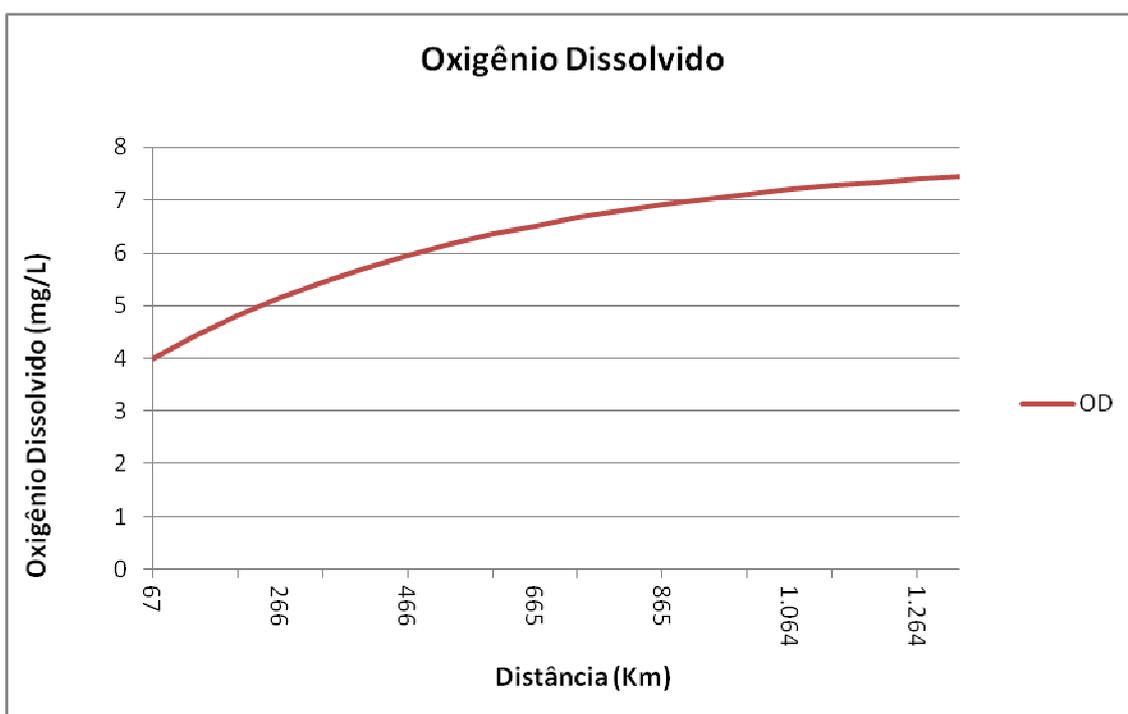
- Figura 54:

- Oxigênio Dissolvido do Reservatório dos Canais : 4,0 mg/L;
- Oxigênio Dissolvido do Rio Xingu no Trecho de Vazão Reduzida: 8,0mg/L.



**Figura 54:** Oxigênio Dissolvido (mg/L) por distância de diluição (Km).

- Figura 55:
  - Oxigênio Dissolvido do Reservatório dos Canais : 2,0 mg/L;
  - Oxigênio Dissolvido do Rio Xingu no Trecho de Vazão Reduzida: 8,0mg/L.



**Figura 55:** Oxigênio Dissolvido (mg/L) por distância de diluição (Km).

### **Consequências da mistura de águas a jusante do reservatório dos canais:**

O efeito-chave analisado aqui é o oxigênio dissolvido, visto que, neste caso é a variável de maior importância para a manutenção da biota aquática. O modelo de simulação mostra, na Figura 53, que, no cenário no qual a água do Reservatório dos Canais sai com uma vazão de 12000 m<sup>3</sup>/s e uma concentração de 6,0 mg/l de oxigênio dissolvido, e no trecho da Volta Grande a água apresenta uma vazão de 4000 m<sup>3</sup>/s e 8,0 mg/l de oxigênio dissolvido, será necessário um trecho de menos de 50 km para que os efeitos da água do reservatório dos Canais sejam diluídos, atingindo novamente uma saturação de 100%. Esse trecho de 50 km será percorrido em um dia (24 horas).

Em um cenário em que as vazões se mantenham, mas as concentrações de oxigênio dissolvido sejam de 4,0 mg/l no Reservatório dos Canais e 8,0 mg/L na Volta Grande, como pode-se ver na Figura 54, a distância do trecho a jusante da Casa de Força varia entre 60 e 100 km para atingir 80% de saturação, o que implicará em um período de 1,5 a 2 dias.

Em um cenário mais crítico, onde as vazões permanecem as mesmas, mas as concentrações de oxigênio dissolvido sejam de 2,0 mg/l no Reservatório dos Canais e 8,0 mg/l na Volta Grande, como pode-se ver na Figura 55, será necessário um trecho de 260 a 330 km para atingir 80% de saturação de oxigênio dissolvido na água, o que será atingido em um período de 4 a 5 dias.

A concentração de 8,0 mg/l de oxigênio dissolvido foi determinada a partir dos dados obtidos no diagnóstico da qualidade da água onde, no local onde será instalada a Casa de Força (ponto RX11), foram observadas concentrações de 8,56 mg/l de oxigênio dissolvido no período de enchente (janeiro de 2007) o que correspondeu a uma percentagem de saturação de 115,3%. O modelo partiu de cenários com 6, 4 e 2 mg/l por serem níveis menores que 8, posto que o Reservatório dos Canais poderá apresentar estes níveis de oxigênio dissolvido devido a estratificação da água ali contida. Este processo ocorrerá somente durante o período de vazante em que o Reservatório dos Canais terá circulação mais baixa, estratificação térmica e química. Durante os períodos de enchente não haverá este problema uma vez que as vazões e a saturação de oxigênio serão elevadas (100% de saturação de O<sub>2</sub>) no Reservatório dos Canais e a jusante da Casa de Força.

#### **4.5 Determinação da Biomassa Inundada de Floresta na Fase de Enchimento dos Reservatórios**

A avaliação da concentração de carbono oxidável remanescente no reservatório em função da vegetação inundada foi feita em função de que o carbono oxidável representa a matéria orgânica em decomposição.

Para a determinação da quantidade de carbono oxidável presente em cada parcela vegetal, foram consideradas as taxas abaixo (Tabela 10), que mostram a quantidade em toneladas de carbono oxidável gerada para cada hectare de floresta ou desmatamento.

**Tabela 10:** Quantidade de carbono oxidável presentes em cada parcela vegetal.

Carbono Oxidável	Densidade (t/ha)				
	Galhos	Folhas	Casca	Serrapilheira	Total
<b>Floresta Ombrófila Aluvial</b>	2,8138	2,342	1,06108	1,2675	7,48438
<b>Floresta com menor Biomassa</b>	1,4069	1,171	0,5305	0,6337	3,7421
<b>Floresta com Biomassa Intermediária</b>	1,72	1,58	0,84	0,94	5,08
<b>Desmatamento</b>	-	-	-	-	2,64

Sabendo que as áreas de vegetação inundada do reservatório principal e do reservatório dos canais são respectivamente de 29.382,64 ha e 10.800,00 ha. A transferência destas cargas se dá gradualmente, admitimos que a biomassa inundada vai sendo solubilizada a uma taxa de 0,080/dia, ou seja, a cada dia 8% do carbono oxidável remanescente na biomassa inundada se torna disponível.

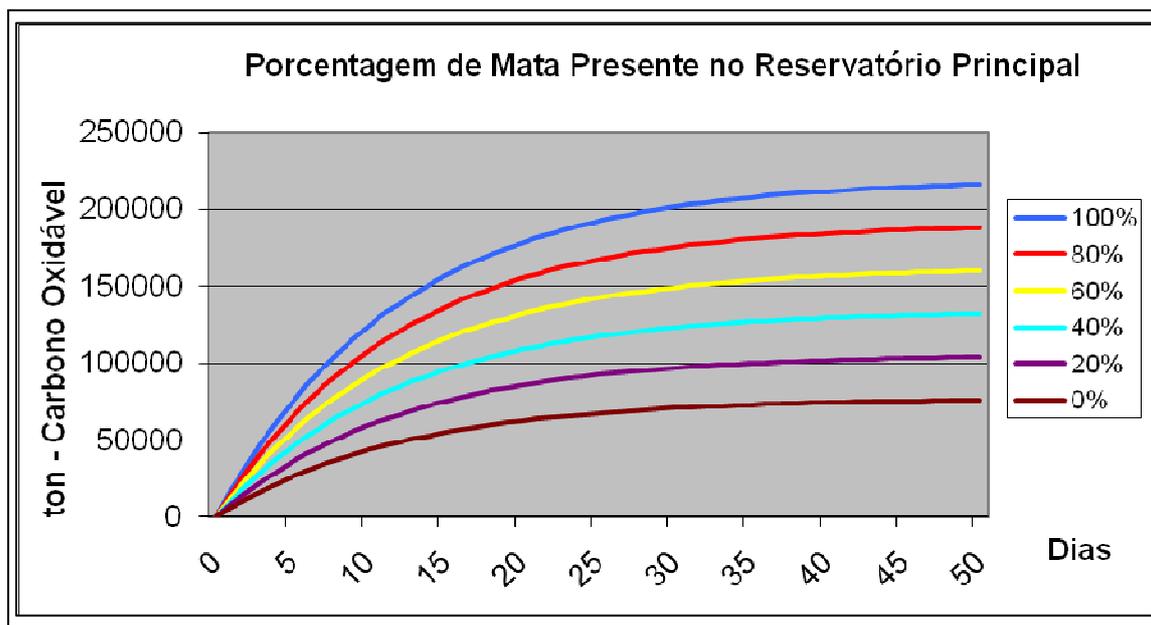
Para um melhor estudo da qualidade da água no reservatório, viu-se necessário o cálculo da quantidade de DBO presente nos reservatórios, respeitando a seguinte relação:

Relação de demanda de oxigênio por matéria carbonácea = 2,7Kg (DBO/Kg(C)).

#### 4.5.1 Reservatório Principal.

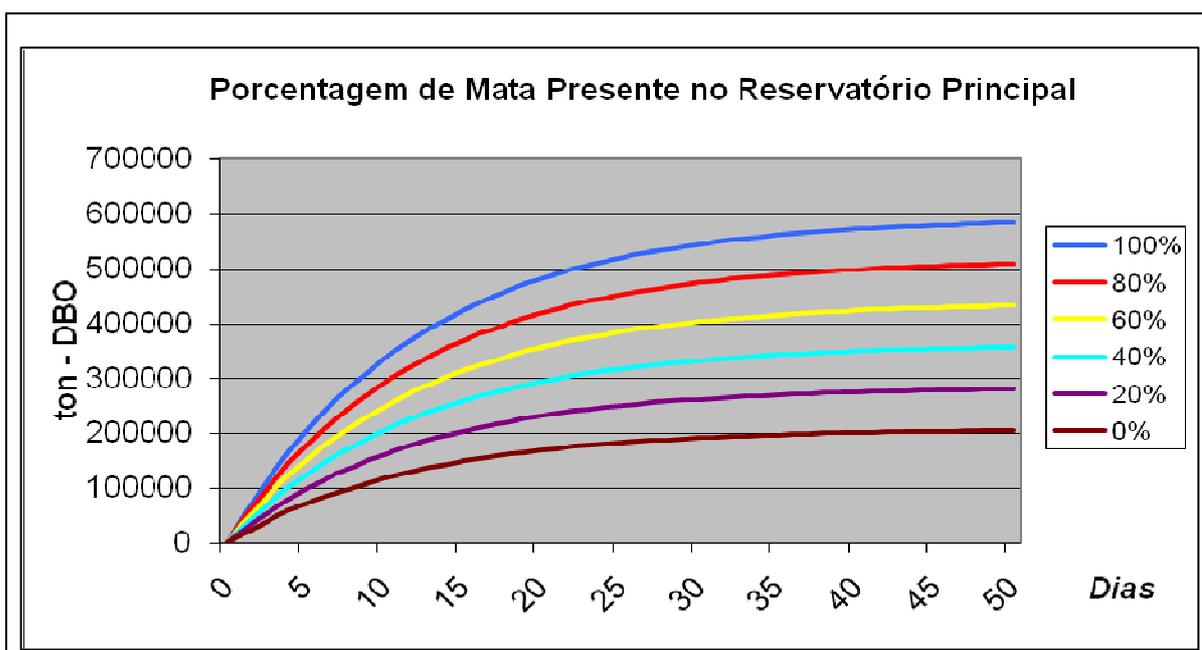
- **Floresta Ombrófila Aluvial:**

Na Figura 56 é apresentado o gráfico da quantidade de carbono oxidável relacionada com a quantidade de mata no Reservatório Principal para uma Floresta Ombrófila Aluvial.



**Figura 56:** Tonalidade de Carbono Oxidável por Porcentagem de Mata Presente no Reservatório Principal para uma Floresta Ombrófila Aluvial.

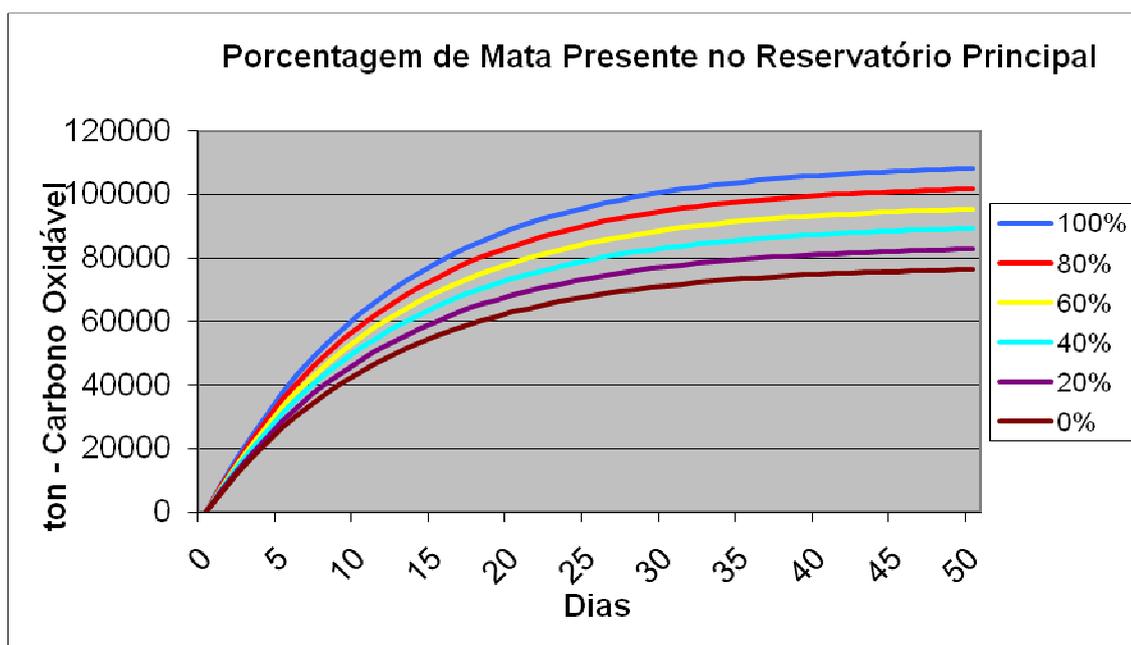
Na Figura 57 observa-se o gráfico da quantidade de DBO relacionada com a quantidade de mata no Reservatório Principal para uma Floresta Ombrófila Aluvial.



**Figura 57:** Tonelada de DBO por Porcentagem de Mata Presente no Reservatório Principal para uma Floresta Ombrófila Aluvial.

- **Floresta de Inundação com menor Biomassa:**

Na Figura 58 é apresentado o gráfico da quantidade de carbono oxidável relacionada com a quantidade de mata no Reservatório Principal para uma Floresta de Inundação com menor Biomassa.



**Figura 58:** Tonelada de Carbono Oxidável por Porcentagem de Mata Presente no Reservatório Principal.

Na figura 59 observa-se o gráfico da quantidade de DBO relacionada com a quantidade de mata no Reservatório Principal para uma Floresta Ombrófila Aluvial.

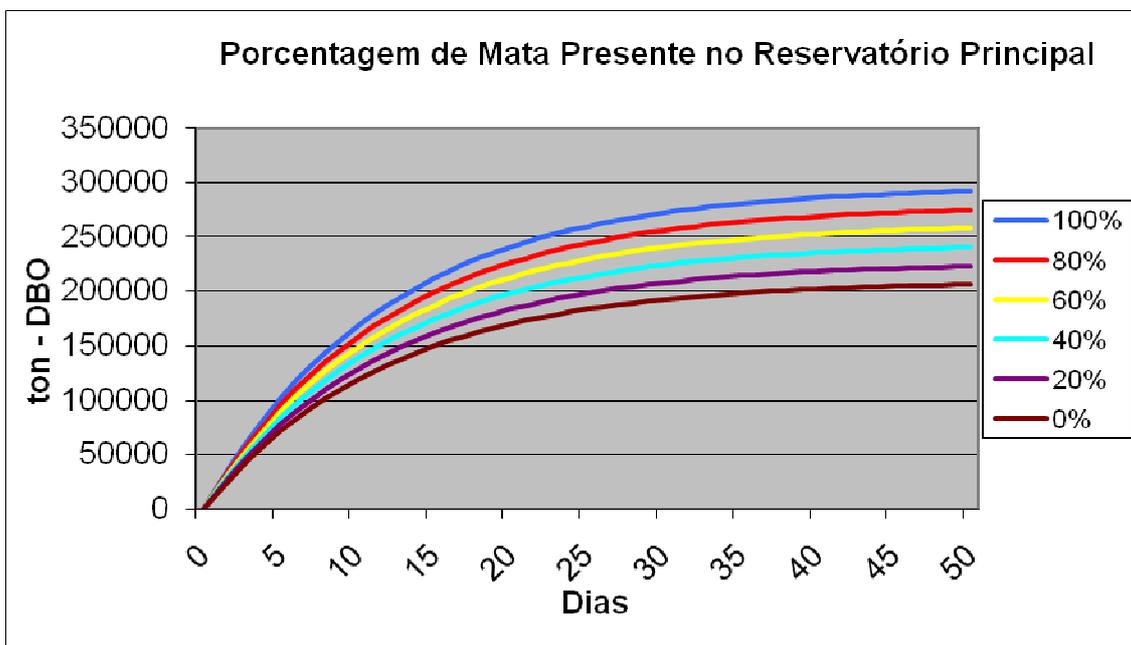
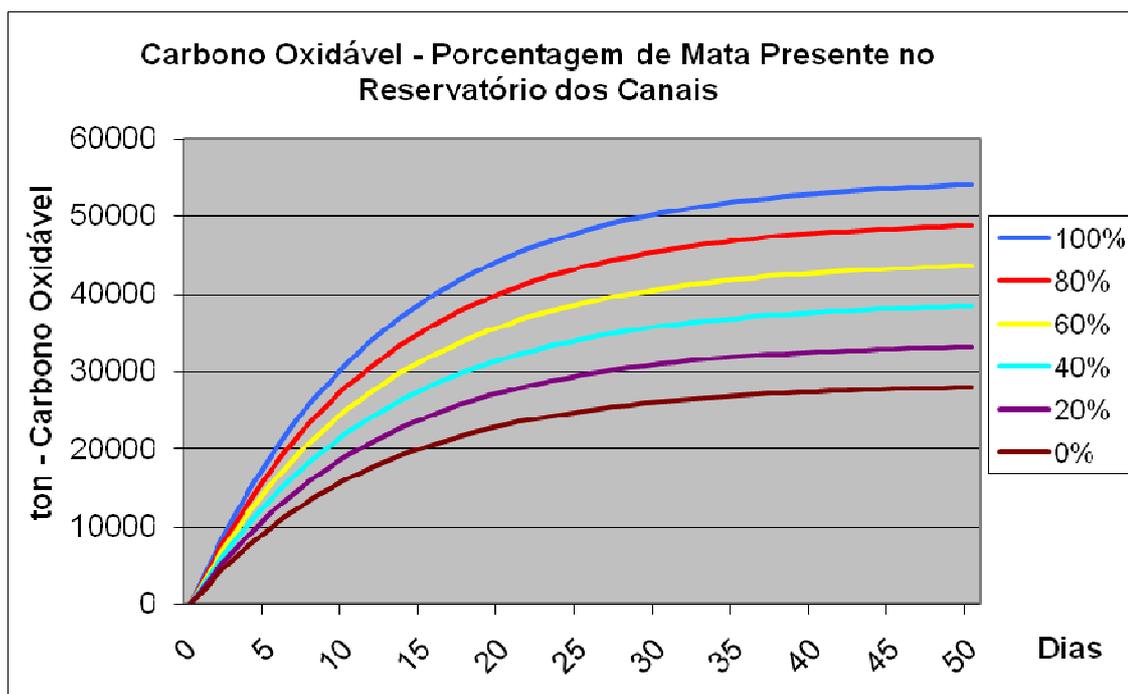


Figura 59: Tonelada de DBO por Porcentagem de Mata Presente no Reservatório Principal.

#### 4.5.2 Reservatório dos Canais.

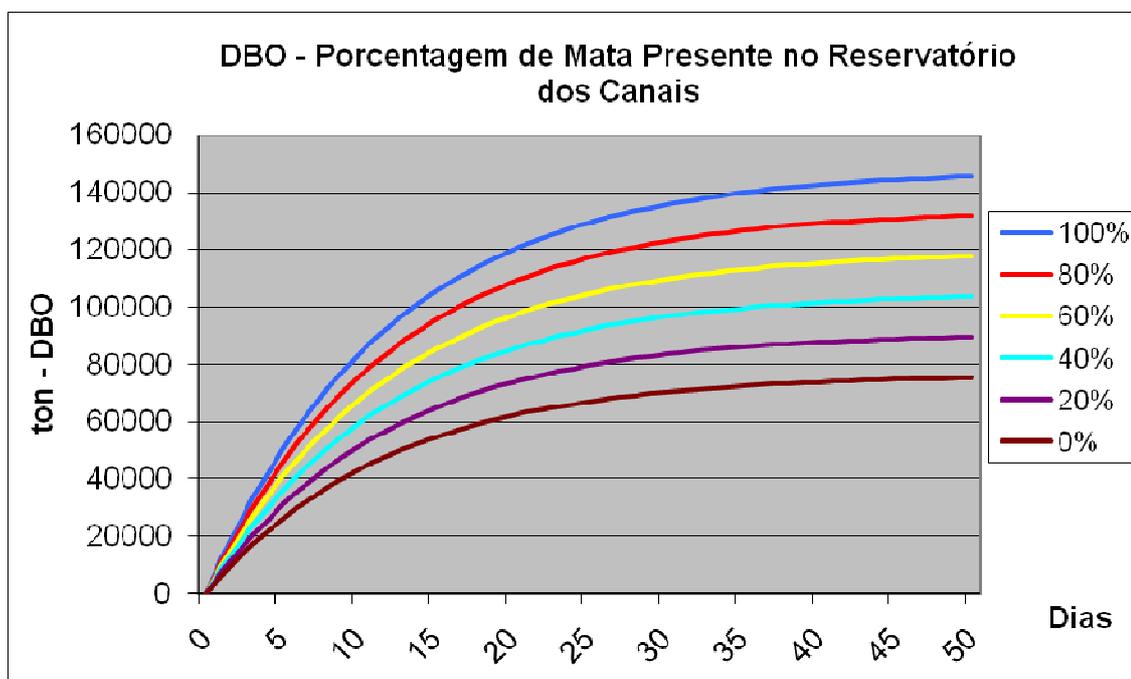
- Floresta de inundação com biomassa intermediária.

Na Figura 60 é apresentado o gráfico da quantidade de carbono oxidável relacionada com a quantidade de mata no Reservatório dos Canais para uma floresta de inundação com biomassa intermediária.



**Figura 60:** Tonelada de Carbono Oxidável por Porcentagem de Mata Presente no Reservatório dos Canais.

Na figura 61 observa-se o gráfico da quantidade de DBO relacionada com a quantidade de mata no Reservatório dos Canais para uma floresta de inundação com biomassa intermediária.



**Figura 61:** Tonelada de DBO por Porcentagem de Mata Presente no Reservatório dos Canais.

### 4.5.3 Discussão

Com o cálculo da quantidade de carbono oxidável em função da área de desmatamento para uma floresta ombrófila aluvial e para uma floresta de menor biomassa, dá ao gestor do futuro empreendimento a necessária ferramenta para calcular quanto de remoção da vegetação no corpo dos dois reservatórios seria necessário para manter a mínima concentração de carbono oxidável. Também foi calculada a DBO em toneladas referente ao carbono remanescente e proveniente da vegetação. Neste caso, verifica-se que para os dois reservatórios 100% de desmatamento é altamente positivo na redução da DBO e na tonelagem de carbono oxidável remanescente. **Estes dados indicam que quanto mais mata for removida na área dos reservatórios antes da inundação, melhor será a qualidade da água nos reservatórios e conseqüentemente à jusante.** Verifica-se que a remoção de 100% da vegetação reduz a um mínimo a DBO e o carbono oxidável. Esta medida evita a descarga de matéria orgânica com grande quantidade a jusante e contribui sensivelmente para melhorar a qualidade da água a jusante dos dois reservatórios.

## 5 A qualidade da água nos diferentes compartimentos do trecho do rio Xingu

Foi realizada uma estimativa das cargas de nutrientes na Área Diretamente Afetada pelo empreendimento AHE Belo Monte, o que corresponde neste estudo, ao trecho entre a foz do rio Iriri e a vila de Senador José Porfírio.

As cargas de fósforo total, nitrogênio total kjeldahl e carbono total dissolvido, foram calculados utilizando a vazão média do período de estudo (janeiro de 2007 a março de 2008) e as concentrações médias observadas nos pontos a montante e jusante de cada trecho.

Os trechos considerados foram:

- Reservatório Principal - desde a foz do rio Iriri até o sítio Pimental
- Volta Grande do Xingu (TVR) – desde a Ressaca até a montante da vila de Belo Monte
- Jusante da Casa de Força (TRV) – desde a vila de Belo Monte até a vila de Senador José Porfírio

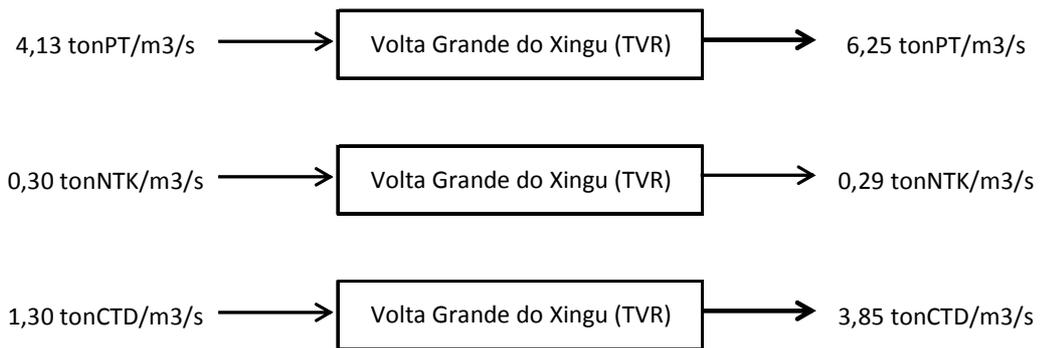
Na Figura 62 se encontram representadas esquematicamente as cargas de entrada e saída para o trecho correspondente ao reservatório do Xingu. As cargas de fósforo total, nitrogênio total e carbono total dissolvido aumentaram 29, 50 e 278%, respectivamente, entre os pontos considerados como de entrada e saída. Considerando que neste trecho se encontra o maior núcleo populacional, a cidade de Altamira, é esperado um aumento das cargas de nutrientes, principalmente as orgânicas originadas nas descargas de efluentes não tratados no rio, tanto por fontes pontuais ou difusas. As ilhas aluviais, igarapés e igapós existentes neste trecho, também aportam nutrientes, provindos da decomposição da matéria orgânica submersa nas épocas de enchente e cheia.



**Figura 62.** Carga de nutrientes de entrada e saída no trecho do reservatório do Xingu. Cargas médias de fósforo total, nitrogênio total kjeldahl e carbono total dissolvido para o período de estudo (janeiro 2007-março 2008).

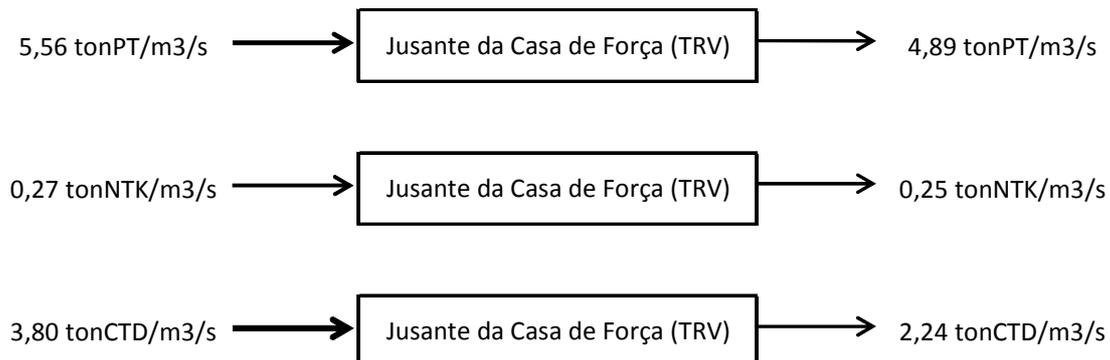
Na Figura 63 se encontram representadas esquematicamente as cargas de entrada e saída para o trecho correspondente a Volta Grande do Xingu ou Trecho de Vazão Reduzida (TVR). As cargas de fósforo total e carbono total dissolvido aumentam um 51 e 196%, respectivamente, enquanto que as concentrações de nitrogênio total se mantiveram constantes.

Neste trecho as áreas com maiores atividades antropogênicas se encontram a montante, na ilha da Fazenda e na Ressaca. As características da área dos pedrais favorecem a oxigenação da água e a oxidação da matéria orgânica. Por outro lado a produção primária e secundária também são favorecidas nas áreas de remanso que se formam entre as pedras o que também explica o aumento das concentrações de carbono dissolvido.



**Figura 63.** Carga de nutrientes de entrada e saída no trecho da Volta Grande do Xingu. Cargas médias de fósforo total, nitrogênio total kjeldahl e carbono total dissolvido para o período de estudo (janeiro 2007-março 2008).

Na Figura 64 se encontram representadas esquematicamente as cargas de entrada e saída para o trecho correspondente a Jusante da Casa de Força ou Trecho de Restituição de Vazão (TRV). As cargas de fósforo total, nitrogênio total e carbono total dissolvido diminuem um 12, 7 e 41%, respectivamente. Em este trecho o rio Xingu é mais largo, e a pesar de receber os efluentes de Belo Monte e Vitória do Xingu o rio consegue se recuperar rapidamente, diminuindo as cargas de nutrientes.



**Figura 64.** Carga de nutrientes de entrada e saída no trecho a Jusante da Casa de Força. Cargas médias de fósforo total, nitrogênio total kjeldahl e carbono total dissolvido para o período de estudo (janeiro 2007-março 2008).

## 6 Considerações Finais

Os quatro compartimentos da região do Rio Xingu, onde será construído o empreendimento da AHE Belo Monte, apresentam características distintas do ponto de vista da qualidade da água e ecológico, porém dominados e controlados por uma função de força fundamental que é o ciclo hidrológico, representado pelas curvas hidrométricas de máximas durante os períodos de Janeiro a Março/Abril e de mínimas de Maio a Setembro/Outubro.

Straskraba, Tundisi & Duncan (1993); Straskraba & Tundisi, 1999; Kennedy (1999); Straskraba & Tundisi (2000); Kennedy et al (2003) e vários outros autores (sumário em Wetzel, 2001) demonstraram os efeitos da construção e operação de reservatórios no ecossistema rio, remanescente a jusante. Os efeitos do reservatório no ecossistema a jusante podem ser demonstrados para:

- **Hidrologia e vazão**
- Temperatura da água a jusante.
- Alteração nas variáveis químicas: oxigênio dissolvido, H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub>, nitrogênio e fósforo, matéria orgânica.
- Alterações nas variáveis biológicas: composição do plâncton: composição da fauna de macro invertebrados bentônicos.
- Alterações na fauna ictica.

As condições em que estas alterações ocorrem, segundo estes autores, são (causas das modificações a jusante):

- Tempo de retenção elevado dos reservatórios (> 30 dias).
- Altura da saída da água no hipólímnio dos reservatórios estratificados.
- Índice de Estado Trófico dos reservatórios elevado com altas concentrações de P e N.
- Reservatórios com grande profundidade e estratificados (> 50 m profundidade média).
- Portanto, verifica-se que as condições de construção do reservatório e as características limnológicas destes ecossistemas e a sua qualidade da água são fundamentais para influenciar o sistema a jusante (Straskraba & Mansberger, 1988).

A modelagem matemática e ecológica dos compartimentos demonstrou que o reservatório principal apresentará os seguintes comportamentos:

- Baixo tempo de retenção (<5 dias).
- Baixo aporte de nutrientes a partir da bacia hidrográfica.
- Alta oxigenação.

- Transporte elevado de material em suspensão e de plâncton.
- Alta capacidade de autodepuração.

Este comportamento é bastante favorável à gestão do empreendimento, pois apresentará impactos reduzidos à qualidade da água e à biota aquática.

O Trecho de Vazão Reduzida, que é o 2º compartimento, **funcionará de acordo com os ciclos hidrológicos estacionais, se forem mantidos durante o período de vazante. Os pulsos hidrológicos e as flutuações de descarga entre 700 a 1.200 m<sup>3</sup>/s.**

As simulações realizadas com a concentração de oxigênio dissolvido, nitrogênio, fósforo total e condutividade elétrica, mostram que a manutenção da qualidade da água e da integridade ecológica do ecossistema no Trecho de Vazão Reduzida poderá ser mantida com as flutuações e a vazão com esta descarga. Ou seja, é fundamental neste compartimento manter a função de força principal dentro de seus mecanismos de funcionamento mais próximos das condições naturais.

As modelagens e simulações realizadas com o futuro reservatório dos canais mostram as seguintes condições:

- Alto tempo de retenção (>60 dias).
- Baixo aporte de nutrientes (N e P) a partir da bacia hidrográfica.
- Estratificação térmica e química.
- Maior capacidade de retenção de fósforo.
- Menor capacidade de autodepuração.

Este reservatório, pela sua morfometria, profundidade média e situação geográfica, poderá apresentar diferentes níveis de estratificação e resistência térmica à circulação. Conseqüentemente durante o período de vazante a degradação da qualidade da água será elevada com possível anoxia no hipolímnio e conseqüentemente desoxigenação da água à jusante dos reservatórios dos canais a partir da primeira descarga durante a enchente.

**A manutenção da bacia hidrográfica do reservatório dos canais em condições de preservação e com baixo aporte de N e P e material em suspensão é fundamental para diminuir o impacto na qualidade da água deste reservatório.**

O 4º compartimento, a região do Rio Xingu localizada a jusante da casa de força e da Volta Grande do Rio Xingu, deverá sofrer os impactos da baixa qualidade da água acumulada no reservatório dos canais imediatamente após a primeira descarga de água durante a enchente, para a geração de energia. A manutenção de uma vazão de 700 a 1.200 m<sup>3</sup>/s no Rio Xingu para a preservação do funcionamento do trecho de Volta Grande (2º compartimento) poderá ser um fator adicional positivo na re-aeração do 4º compartimento (trecho a jusante da casa de força).

A modelagem matemática e as simulações realizadas demonstraram a complexidade de todo o sistema, o que poderá ser resolvido combinando-se a operação dos reservatórios e a geração de energia com a preservação da qualidade da água e ações adicionais de engenharia, especialmente no reservatório dos canais para minimizar os impactos.

Neste trabalho ficou evidente que a integração de princípios de limnologia e funcionamento de sistemas de reservatórios, com a engenharia e operação destes sistemas e as considerações ambientais e sociais são fundamentais para o gerenciamento do AHE Belo Monte. Tanto o arranjo programado como a operação programada do sistema deverão causar impactos reduzidos a jusante sendo, portanto, fundamental manter relações adequadas combinando geração de energia elétrica, mitigação de impactos promovendo desenvolvimento regional sustentável. O monitoramento futuro em tempo real deverá promover permanente avaliação do funcionamento do sistema e a eficiência da operação e possibilitará correções na operação que deverão efetivar a mitigação de impactos e promover a necessária sustentabilidade.

A construção e gestão de reservatórios na Amazônia é um processo complexo de alta relevância estratégica para o Brasil (Tundisi, 2007) e, portanto, o AHE Belo Monte deverá ser o primeiro reservatório com controle efetivo da operação que possibilitará condições ecológicas articuladas com condições hidrológicas que manterão a sustentabilidade do sistema e possibilitarão aplicar os conceitos de ecologia para a gestão de recursos hídricos nessa região (Zalewski, Tundisi, 2008, submetido para publicação).

## 7. Conclusões e recomendações

- Os diferentes compartimentos do AHE Belo Monte apresentaram comportamento diverso quanto ao Índice de Estado Trófico, concentração de fósforo e nitrogênio, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido. As simulações realizadas mostraram que embora ocorram variações das condições referentes a estas variáveis no Trecho de Vazão Reduzida e a jusante do reservatório dos canais estas alterações não afetarão a fauna e flora aquáticas e a qualidade da água com as vazões remanescentes. Especialmente para o caso do oxigênio dissolvido e a condutividade elétrica, duas variáveis fundamentais para a manutenção da vida aquática, as variações que ocorrerão não afetarão a qualidade da água ou a vida aquática, podendo ser consideradas satisfatórias.
- Para a manutenção de uma margem de segurança quanto às vazões no Trecho de Vazão Reduzida recomenda-se uma vazão entre 800 a 1200 m<sup>3</sup>/s como sendo a vazão ecológica que manterá as condições de qualidade da água e a vida aquática. O mesmo volume deverá ser mantido a jusante do reservatório dos canais. Esta vazão deverá dar condições satisfatórias para a qualidade da água do Rio Xingu e dos reservatórios e nos vários compartimentos, preservando a integridade do ecossistema.
- Os resultados das simulações mostraram que é fundamental o tratamento de esgotos da cidade de Altamira para a redução de cargas pontuais de fósforo, e o controle das cargas difusas também para redução das cargas de **P** tanto no reservatório principal quanto no reservatório dos canais. O controle das cargas difusas dar-se-á através do controle do desmatamento (redução do desmatamento) na área do reservatório principal, no Rio Xingu a jusante deste reservatório e na área do reservatório dos canais e a jusante, ou seja, o controle das cargas não pontuais deverá dar-se nos quatro compartimentos.

- As experiências acumuladas em outros reservatórios mostram que o principal componente que influencia as vazões e a qualidade da água à jusante é o tempo de retenção e o nível de estado trófico do reservatório a montante (no caso específico do AHE Belo Monte, o reservatório principal). Dadas as condições do reservatório principal e o controle do estado trófico deste compartimento sendo efetivo, a qualidade da água a jusante não sofrerá grandes alterações variações que alterem a vida aquática e os usos múltiplos da água. Estas condições estão conformes com a experiência de outros sistemas descritos na literatura corrente sobre este problema (Straskraba, Tundisi & Duncan, 1993; Kennedy et al, 2003).
- Para o efetivo controle da qualidade da água no reservatório principal, a jusante deste reservatório no reservatório dos canais e a jusante deste reservatório, recomenda-se a instalação de um sistema de monitoramento em tempo real que possibilitará o acompanhamento da qualidade da água em função da operação do sistema e a correção da operação em caso de necessidade ou de melhorar a qualidade da água a jusante. Recomenda-se, portanto, a instalação de oito estações de monitoramento em tempo real para determinação da qualidade da água (variáveis químicas recomendadas: temperatura, pH, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, turbidez, potencial redox) nos quatro compartimentos distribuídas de acordo com a determinações químicas, físicas e biológicas, realizadas nos seguintes pontos: RX03; RX04; RX06; RX07;RX11; RX17;RX20;BAC01.
- A determinação da qualidade da água na superfície em tempo real, simultaneamente à operação do sistema, deverá das condições para uma gestão efetiva da operação e a correção de eventuais problemas a jusante dos dois compartimentos de reservatórios.
- É fundamental apresentar um desenho operacional de todo o sistema que poderá viabilizar a produção de hidroeletricidade e a manutenção da qualidade da água do sistema, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e a minimização e correção de futuros impactos decorrentes da construção do empreendimento devido ao estímulo à economia regional e ao seu desenvolvimento proporcionado pelo próprio empreendimento.
- O projeto de engenharia poderá agregar valor se a discussão entre os técnicos e pesquisadores (que trabalham na elaboração do programa de gestão da qualidade da água para a preservação do funcionamento e estrutura do sistema) e os engenheiros do projeto e operação, avançar para incluir informações e dados fundamentais úteis para melhorar as características da construção e minimizar os impactos, especialmente no reservatório dos canais.
- A modelagem matemática e ecológica baseou-se nos dados obtidos nas campanhas de campo, nas informações e características do empreendimento, no funcionamento do sistema natural a partir do ciclo hidrológico e nas experiências e informações obtidas com outros reservatórios da Amazônia. O reservatório dos canais é o compartimento mais complexo deste empreendimento e ações especiais de monitoramento, engenharia de operação e construção e de gestão da qualidade das águas e do empreendimento devem ser encetadas para resolver este problema.

- A eutrofização do Reservatório dos Canais pode resultar em um aumento de cianobactérias e de macrófitas aquáticas, as quais deverão aumentar a contribuição de matéria orgânica para este reservatório durante a sua decomposição.

### 7.1. Pulsos a jusante

A manutenção de pulsos a jusante pode ser feita através da operação, mantendo um sistema de variação das vazões entre 700 a 1200 m<sup>3</sup>/s, no período de vazante, o que deverá manter a qualidade da água e ao mesmo tempo manter o sistema de pulsos nesse período.

### 7.2. Controle da bacia hidrográfica

Resulta, portanto, que a manutenção da qualidade da água a jusante dos reservatórios através da operação do sistema e da manutenção de pulsos seguindo um **“hidrograma ecológico”** depende não só das características dos reservatórios e sua operação, mas da bacia hidrográfica, seus usos, preservação e desenvolvimento sustentável.

De acordo com James et al (2003), cada lago, reservatório ou rio é único devido ao sistema biogeofísico local, os usos da bacia hidrográfica e os processos culturais, econômicos e políticos que estão em operação em cada região. Planos de gestão constituem, portanto, um arcabouço que deverá manter os contornos principais para cada caso, levando-se em conta usos e necessidades locais e regionais. Segundo esses autores, a identificação e diagnóstico dos principais problemas é a base para um planejamento adequado. Opções estratégicas e mecanismos futuros de operação com um envelope de opções são processos com valor agregado que possibilitam manejo integrado e preditivo. As conseqüências destas estratégias e das opções baseadas em simulações e dados reais devem estar dentro de um contexto dos **limites das alterações aceitáveis**. É o que se procurou estabelecer neste trabalho: **dar condições para operar o sistema e os compartimentos** de forma a gerar a necessária energia hidroelétrica e manter a sustentabilidade.

## 8 . Referências bibliográficas

**Carlson, R.E. 1977.** A Tropic State Index for Lakes. *Limol. Oceanogr.*, 19: 767- 73.

**CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental,** Índice de Estado Trófico [relatório na internet]. São Paulo; [acesso em 05 nov 2008]. Disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice\\_iva\\_iet.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice_iva_iet.asp)

**Cole, G. A., 1983.** Textbook of Limnology. The C. V. Mosby Company. St. Louis, Toronto, London, Third Edition, 401 pp.

**Henderson-Sellers, B; Davis, J.R; Webster, I.T; Edwards, J.M.1993.** Modern tools for environmental management. Water quality. In: Jakeman, A.J. Beck, M.B. and McAleer (Editors). Modelling change in environmental Systems. John Wisley & Sons Ltda. Chichester, England 519-542.

**Jorgensen, S.E.; Löfler, H; Rast, W. and Straskraba, M.2005.** Lake and reservoir management. Elsevier. Development in Water Sciences, vol. 54, 502 pp.

**Kennedy, R., 1999.** Reservoir design and operation: Limnological implications and management opportunities. Pp. 1-28. In: Tundisi, J.G. and Straskraba, M. (Editors). Theoretical reservoir ecology and its applications. IIE; BAS; Backhuys Publishers. 585 pp.

**Kennedy, H.R.; Tundisi, J.G.; Straskrabova, V.; Lind, O.T.; Hejzlzan, J. 2003.** Reservoirs and the limnologists Grawing role in sustainable water resource management. *Hydrobiologia*. Vol. 504 pp. xi-xii.

**Kerekes, J. 1981.** The application of phosphorus load-trophic response relationships to reservoirs Proceedings. Int. Symp. On Res. Ecol. and Management. University Laval, Quebec. pp. 349-354.

**Mediondo, E.M., 2000.** Integrated eco-hydraulics options for recoery of life and safety in aquatic enviroments. Pp 1-19. In: Maione, Majone Lekto & Morti (Editors). New Trends in water and Environmental Engineering for safety in life. Balhema, Rotterdam.

**Novotny, V.; Olem, H. 1994.** Water Quality: prevention, identification and management of diffuse pollution. Van Nostrand Reinhold, New York.

**Salas, H. J.; Martino, P., 1991.** A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Water Research*, v. 25, n. 3, p. 341-350, 1991.

**Schmidt, W. 1928.** Uber Temperature und Stabilitats Verhatmisse von Seem. *Geogr. Ann.* Vol. 10, pp. 145-177.

**Somlyody, L., Yates, D, Varis, O., 2001.** Challenges to Freshwater Management. *Ecohydrology & Hydrology*, Vol.1, n° 1, 2; 65-95 pp.

- Straskraba, M. 1973.** Limnological basis for Modelling Reservoir Ecosystems Geophysical Monograph Series: Sckerman W.C., Wite, G.F. and Worthington E.B.(Editors). Man Made Lakes. Their Problems and Environmental Effects. Vol. 17, 517-535.
- Straskraba, M.,1985.** Managing of eutrophication by means of ecotechnology and mathematical modelling. Intern. Congress lakes Poll. and Recovery, Rome. pp 17-28.
- Straskraba, M.; Tundisi, J.G. and Ducan, A., 1993.** State of the art of reservoir limnology and water polity management. Pp. 2 13-288. In: Straskraba, M. Tundisi, J.G.; and Ducan, A. Comparative Reservoir Limnology and water quality Management. Kluver Academic Publishers, Dordrecht. 293 pp.
- Straskraba, M. 1999.** Retention Time as a Key Variable of Reservoir Limnology. Pp. 385-410. In: Tundisi, J.G. and Straskraba, M. Theoretical Reservoir Ecology and its Application. BAS Backhuys Publishers; IIE. 585 pp.
- Straskraba, M.; Tundisi, J.G., 1999.** *Reservoir water quality management*. ILEC. (Guideline series n.9). 129pp.
- Straskraba, M.; Tundisi, J.G. 2000.** Diretrizes para o gerenciamento de lagos. Vol. 9. Gerenciamento da Qualidade de Água de reservatórios. ILEC/ IIE, 238 pp.
- Tanik, A.; Beler Baykal, B.; Gonenc, I. E. 1999.** The impact of agricultural pollutants in six drinking water reservoirs. Water Science and Technology, v.40, n.2, p.11-17.
- Tundisi, J.G. and Strasakraba, M. (Editors). 1999.** Theoretical reservoir ecology and its application. IIE; BAS; Backhuys Publishere, 585 pp.
- Tundisi, J.G.; Matsumura-Tundisi, T.; Abe, D.S.; Matsumura-Tundisi, J.E.G. 2005.** Ecological impacts of hydroelectric reservoirs and perspectives for their integrated management. Pp 67-81. In: Rosa, L.P. Santos, M.A. and Tundisi, J.G. (Editors) Greenhouse gas emissions from hydropower reservoirs and water quality Coppe UFRJ.
- Tundisi, J.G., 1999.** Theoretical basis for reservoir management. In: Tundisi, J.G. Straskraba, M. (Editors). Theoretical reservoir ecology and its applications. IIE, BAS. Backhuys Publisher, 585 pp.
- Tundisi, J.G., 1984.** Estratificação hidráulica em reservatórios e suas conseqüências ecológicas. Cienc. Cult. Vol. 36, pp. 1498-1504.
- Vollenweider, R.A. 1976.** Advances in Defining Critical Loading Levels For Phosphorus in Lake Management. Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 33: 53-83.
- Vollenweider, R.A. 1987.** Scientific concepts and methodologies pertinent to lake research and lake restoration. Swiss. J. Hydrol., v.49, n.2; 129-147pp.
- Wetzel, R., 2001.** Limnology: Lakes and River Ecosystem. 3<sup>rd</sup> ed. Academic Press, 1006 pp.