

12.1.1.5. Modelagem Matemática de Qualidade das Águas

a) Introdução

A inundação da vegetação é a causa de um dos principais impactos que ocorrem na qualidade da água pela implantação de reservatórios. Durante este processo, observa-se o desencadeamento de uma série de reações de natureza físico-química e biológica, as quais podem provocar impactos significativos no meio biótico.

Duas fases são identificadas neste processo:

- ✓ Fase de enchimento do reservatório, onde se observa a ocorrência de condições mais críticas em termos de qualidade da água. A biomassa vegetal residente é afogada e se decompõe, liberando uma grande quantidade de compostos orgânicos e nutrientes, com possibilidades de estabelecimento de condições anóxicas. Este processo ocorre até o reservatório alcançar o seu nível operacional, a partir do qual toda a vegetação estará incorporada; e,
- ✓ Fase de operação, onde ocorre o consumo de toda a matéria orgânica inundada ao longo do tempo e posterior estabilização das condições bioquímicas do meio aquático. A formação do reservatório propicia um novo equilíbrio ao sistema hídrico, condicionando tempos de residência relativamente elevados e favorecendo a ocorrência de processos eutróficos. No ciclo de estabilização do regime hidráulico ocorre também a estratificação térmica do reservatório, onde são formados dois reatores bioquímicos distintos, o hipolimnion e o epilimnion.

Para representar estes processos, são utilizados três modelos de simulação inter-relacionados:

- ✓ **Modelo hidráulico.** Concebido para retratar o processo de circulação da água no reservatório, durante as fases de enchimento e operação. A simulação destes processos é realizada pelo programa MEKONG, apropriado à modelação de grandes planícies de inundação.
- ✓ **Modelo de eutrofização.** O modelo de eutrofização baseia-se fundamentalmente no módulo EUTRO4 do modelo de simulação de qualidade da água WASP4 (Water Quality Analysis Simulation Program) distribuído pela EPA - Environmental Protection Agency, americana. O programa original foi adaptado para capacitar a representação do processo de incorporação e biodegradação da matéria vegetal inundada.
- ✓ **Modelo de estratificação térmica.** Modelo matemático desenvolvido por Huber e Harleman, do "Massachusetts Institute of Technology", e posteriormente aplicado em diversos reservatórios, com significativo sucesso.

Nos itens, a seguir, é apresentada a seqüência de atividades consideradas nos estudos, descrevendo inicialmente a conceituação teórica dos modelos e, posteriormente, as fases de preparação dos dados de entrada, calibragem e aplicação dos modelos de simulação.

b) Conceituação Teórica dos Modelos de Simulação

- Modelo Hidráulico

O modelo apresentado é parte integrante de um sistema destinado à simulação da qualidade da água em reservatórios, gerando as variáveis de natureza hidráulica requisitadas pelo modelo de simulação de qualidade da água.

O modelo matemático concebido é do tipo bidimensional e baseia-se no algoritmo proposto por Jean A. Cunge que o utilizou na modelagem das áreas inundadas do Delta do Mekong.

No processo de modelagem, o corpo hídrico é representado por uma seqüência de compartimentos horizontais e trechos de canais por onde se processa o escoamento entre células vizinhas. As leis de transferência de vazões baseiam-se nas formulações da Fórmula de Manning aliada à expressão da continuidade, cujo sentido do escoamento é função da diferença dos níveis d'água entre as células consideradas.

O condicionante físico que regula o escoamento é ditado principalmente pela topografia local. A água que extravasa de sua calha natural, tem seu fluxo de vazão moldado pelas fronteiras naturais do terreno, tais como meandros, vales irregulares, depressões no terreno e vegetação, o que pressupõe o conhecimento da morfologia da área inundada, a qual deve ser amarrada topograficamente.

- Concepção Teórica

Na aplicação do modelo de células, considera-se que a superfície da água de cada compartimento seja horizontal em toda sua extensão, caracterizada através de seu nível d'água representativo z_i .

Baseado nesta premissa, são admitidas as seguintes hipóteses:

- ✓ O volume de água V_i contido em cada célula está diretamente relacionado com o seu respectivo nível z_i ; e,
- ✓ A transferência da vazão $Q_{i,k}$ entre duas células adjacentes de número de ordem i e k , em qualquer tempo, é função dos seus respectivos níveis d'água.

Ou seja:

$$V_i = V(z_i)$$

$$Q_{i,k} = f(z_i, z_k)$$

Onde i e j são os números de ordem das células adjacentes.

No balanço de massa, em uma dada célula de ordem i , são considerados os fluxos de vazões que ocorrem entre esta e as células adjacentes. A equação da continuidade representativa deste processo é a seguinte:

$$A_{s_i} * dz_i / dt = Q_{i,k} \quad (1)$$

Onde:

A_{s_i} = área da superfície da célula i correspondente ao nível z_i

$Q_{i,k}$ = vazão entre as células i e k em função dos níveis z_i e z_k

A transferência de vazões entre células baseia-se na equação dinâmica, onde são desprezados os termos de inércia e utiliza a fórmula de Manning-Strickler para a declividade da linha da energia:

$$\Delta h / \Delta x = S_0 - S_f \quad (2)$$

Onde:

Δh = diferença de profundidade do escoamento

Δx = distância entre centros de células

S_0 = declividade do terreno entre os centros de células

S_f = declividade da linha de energia

$$S_0 = - \Delta z_p / \Delta x \quad (3)$$

Onde:

Δz_p = diferença de cotas de fundo entre centros de células

$$S_f = Q_{i,k}^2 * n^2 / A_{i,k}^2 * R_{i,k}^{4/3} \quad (4)$$

Onde:

n = coef. de rugosidade da fórmula de Manning entre as células i e k

$A_{i,k}$ = área da seção transversal entre as células i e k

$R_{i,k}$ = raio hidráulico da seção $A_{i,k}$

Os valores $A_{i,k}$ e $R_{i,k}$ associada à seção transversal entre as células i e k são calculados para um nível ponderado z_p , dado por:

$$z_p = \alpha * z_i + (1 - \alpha) * z_k \quad (5)$$

Onde α é um coeficiente de ponderação entre 0 e 1.

No modelo matemático, considerou-se $\alpha = 1/2$, portanto:

$$z_p = (z_i + z_k) / 2 \quad (6)$$

Substituindo as equações (3) e (4) na equação (2) resulta:

$$\Delta h / \Delta x = - \Delta z_p / \Delta x - Q_{i,k}^2 * n^2 / A_{i,k}^2 * R_{i,k}^{4/3} \quad (7)$$

Reorganizando os termos e escrevendo-se a expressão resultante em função da diferença Δz entre os níveis d'água dos centros de cada célula i e k , e explicitando-se a vazão de transferência, resulta:

$$Q_{i,k} = \text{sign} * A_{i,k} * R_{i,k}^{2/3} * (|z_k - z_i|)^{1/2} / n / \Delta x^{1/2} \quad (8)$$

$$\text{sign} = (z_k - z_i) / (|z_k - z_i|)$$

O termo **sign** indica o sinal do fluxo da vazão, sendo considerada positiva quando entra na célula i e negativa quando sai.

Considerando-se na expressão (8) o coeficiente de vazão $\Phi = A_{i,k} * R_{i,k}^{2/3} / n / \Delta x^{1/2}$ resulta:

$$Q_{i,k} = \text{sign} * \Phi * (|z_k - z_i|)^{1/2} \quad (9)$$

- Formulação Numérica do Modelo

No processo de solução numérica, a equação originalmente contínua passa a ser tratada em termos de incrementos finitos. Apresentada desta forma, procura-se uma formulação matemática que a transforme em equações do tipo lineares.

Esta solução parte da discretização da equação da continuidade (1), já citada anteriormente:

$$\mathbf{A}_{si}^n * \Delta z_i^{n+1} / \Delta t = \Sigma \mathbf{Q}_{i,k} \quad (10)$$

Onde:

Δz_i = variação dos níveis de água entre os tempos **n** e **n+1**

Na discretização temporal, o índice **n** será referido ao tempo **n*Δt** anterior ao cálculo onde a variável é conhecida. O índice **n+1** corresponde ao tempo atual, onde se procura o valor desconhecido da variável.

Considerando a aplicação de um esquema implícito ao termo $\mathbf{Q}_{i,k}$, resulta:

$$\mathbf{Q}_{i,k} [Z_i(\tau), Z_k(\tau)] = \Theta * \mathbf{Q}_{i,k}^{n+1} + (1 - \Theta) * \mathbf{Q}_{i,k}^n \quad (11)$$

Onde:

Θ = coeficiente de ponderação no tempo, variável entre 0 e 1

τ = tempo intermediário entre **n * Δt** e **(n + 1) * Δt**

Para $\Theta = 1$, tem-se uma formulação totalmente implícita, condição adotada no modelo hidráulico.

Como as relações de vazões obtidas não são lineares, o sistema é expandido através da aplicação da série de Taylor. Neste processo, desprezam-se os termos de ordem superior e admite-se que as variações Δz_i são pequenas durante o intervalo de tempo Δt . A equação assim desenvolvida resulta:

$$\mathbf{Q}_{i,k}^{n+1} = \mathbf{Q}_{i,k}^n + \delta \mathbf{Q}_{i,k}^n / \delta z_i * \Delta z_i^{n+1} + \delta \mathbf{Q}_{i,k}^n / \delta z_k * \Delta z_k^{n+1} \quad (12)$$

Substituindo o resultado encontrado na expressão (10) resulta no seguinte sistema linear de equações:

$$\mathbf{A}_{si}^n * \Delta z_i^{n+1} / \Delta t = \Sigma \mathbf{Q}_{i,k}^n + \Sigma \delta \mathbf{Q}_{i,k}^n / \delta z_i * \Delta z_i^{n+1} + \Sigma \delta \mathbf{Q}_{i,k}^n / \delta z_k * \Delta z_k^{n+1}$$

O conjunto de equações resultantes, forma um sistema linear, contendo **n** equações a **n** incógnitas pode ser representada numericamente através de uma matriz de coeficientes do tipo esparsa, com muitos elementos nulos.

- Aplicação do Modelo Hidráulico

A modelagem matemática requer um trabalho preparatório dos dados de entrada, devendo compreender as seguintes atividades:

- ✓ Montagem do esquema topológico de células representativo do sistema hídrico;

- ✓ Definição das variáveis temporais, representadas pelas vazões afluentes e defluentes ao corpo hídrico simulado;
- ✓ Calibragem do modelo hidráulico; e,
- ✓ Exploração do sistema com a imposição de cenários alternativos de aportes de vazões hidrológicas e operativas.

Segmentação do Reservatório

A segmentação do reservatório é realizada após uma análise cuidadosa dos fluxos que poderão ocorrer na área alagada, com nível de detalhamento compatível com os níveis de precisão desejados na modelagem.

Este trabalho é baseado em dados cartográficos e levantamentos topobatimétricos de seções transversais realizados ao longo sistema hídrico que, tratados numericamente, permitem a definição dos dados de entrada do modelo matemático.

A delimitação dos segmentos é orientada pelos pontos notáveis que caracterizam o corpo d'água a ser simulado, identificando-se inicialmente os canais onde os escoamentos ocorrem com maior facilidade. Neste processo, a primeira delimitação deverá contemplar os compartimentos representativos do curso d'água principal, separando-os das porções laterais inundadas, onde as velocidades do fluxo d'água se processam de forma mais lenta.

Atenção especial deve ser dispensada aos cursos d'água afluentes ao corpo principal que, dependendo de suas dimensões, deverão ser representadas por segmentos independentes. Nestes locais, em função dos altos tempos de residência, há geralmente a ocorrência de processos de eutrofização.

A partir destes conceitos, define-se o esquema topológico do sistema hídrico, caracterizado por um conjunto de compartimentos individualizados interligados entre si através de canais hipotéticos de drenagem.

Baseado nesta topologia, são definidos os parâmetros geométricos representativos de cada compartimento, o qual é caracterizado através de pares de valores relacionando o nível d'água com a área da superfície líquida.

Os canais de comunicação entre segmentos, definidos preliminarmente nesta fase, são ajustados durante a calibragem do modelo.

Definição das Variáveis Temporais

Os insumos básicos de entrada são constituídos por séries de vazões afluentes e defluentes ao meio hídrico.

As vazões afluentes são representadas pelo aporte principal de vazão aplicada em sua extremidade de montante e aquelas provenientes das contribuições laterais, definidas pelos estudos hidrológicos.

As parcelas relativas às defluências representam as retiradas e/ou as vazões de saída do reservatório, as quais são definidas com base em suas regras operativas.

Calibragem do Modelo Hidráulico

Após a montagem dos dados de entrada, parte-se para a calibragem do modelo de simulação, através da aferição do coeficiente de condutância, que regula o fluxo d'água

entre os segmentos.

Esta tarefa é realizada através de um processo de tentativas, onde se procura um ajuste entre os valores de níveis d'água simulados pelo modelo e os observados que são utilizados como referência no processo de calibragem.

Os valores de referência de níveis d'água adotados na modelagem, provêm dos estudos de remanso do reservatório.

- Modelo Matemático de Eutrofização

O modelo de eutrofização baseia-se fundamentalmente na estrutura lógica do módulo **EUTRO4** do programa **WASP4**, ao qual foram acrescentadas as equações que permitem simular os processos físicos e bioquímicos de incorporação e degradação da biomassa que ocorrem durante as fases de enchimento e operação do reservatório.

A seguir são apresentadas as versões originais do modelo WASP, conforme concebido pela EPA e as alterações implementadas neste programa, capacitando-o para simular os processos associados à incorporação e biodegradação da biomassa inundada.

- Modelo WASP4 Original

O modelo de simulação de qualidade da água **WASP4** (Water Quality Analysis Simulation Program) desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency - USEPA é de larga aceitação nos estudos de planejamento.

As características deste modelo, em termos de estrutura espacial, discretização temporal, versatilidade estrutural e variáveis de estado simuláveis, torna-o adequado para aplicação aos estudos de qualidade da água dos recursos hídricos.

Através dos módulos presentes neste programa, são simulados os efeitos de advecção, dispersão e interação dos diversos constituintes considerados no processo. Os constituintes simulados podem ser conservativos ou não, incluindo-se substâncias tóxicas e as variáveis envolvidas no processo de eutrofização do reservatório.

Estas cinéticas são realizadas por quatro módulos independentes:

- ✓ **DYNHYD4** – Simula o movimento da água em rios, estuários ou reservatórios, cujo processo é representado, matematicamente, por duas equações diferenciais que controlam a conservação da massa e quantidade de movimento do escoamento, conhecidas como Equações de Saint Venant.
- ✓ **Módulo básico** – Simula o transporte dos constituintes conservativos, tais como: cloretos, traçadores químicos etc.
- ✓ **EUTRO4** – Simula especificamente os processos físico-químico que afetam o transporte e a interação entre os nutrientes, fitoplanctons, matéria orgânica e oxigênio dissolvido.
- ✓ **TOXI4** – Simula a evolução e a degradação de elementos tóxicos, através de um grande número de processos químicos e biológicos. Estes processos incluem a biodegradação, hidrólise, fotólise e oxidação química, metais pesados etc.

No módulo **EUTRO4** objeto dos trabalhos de modelagem, são identificados quatro sistemas interativos:

- ✓ cinética fitoplantônica;

- ✓ ciclo do fósforo;
- ✓ ciclo do nitrogênio e
- ✓ balanço do oxigênio dissolvido

No processo de simulação, o corpo hídrico é representado por um conjunto de segmentos ou reatores de mistura completa, onde ocorrem reações envolvendo as seguintes variáveis bioquímicas:

- ✓ Amônia: **NH₃**
- ✓ Nitrato: **NO₃**
- ✓ Ortofosfato: **OPO₄**
- ✓ Clorofila A: **CHLa**
- ✓ Demanda bioquímica do oxigênio: **BOD**
- ✓ Oxigênio dissolvido: **DO**
- ✓ Nitrogênio orgânico: **ON**
- ✓ Fósforo orgânico: **OP**

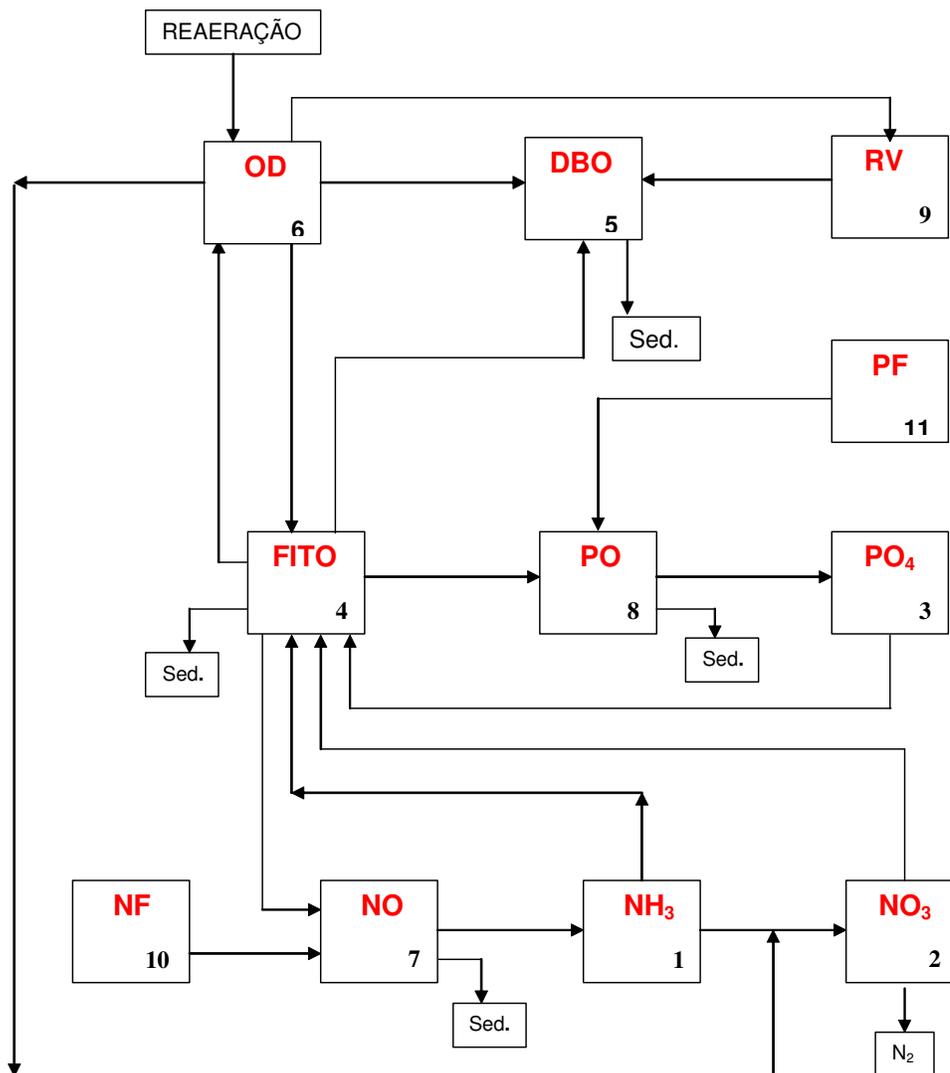
Conforme esquematizado na Figura 12.1.1/04, os processos cinéticos e as reações de transformação envolvem a participação de oito variáveis de estado, os quais são integradas em quatro sistemas interativos:

- ✓ **Cinética fitoplantônica** – Esta cinética assume um destaque central no processo de eutrofização, interagindo e afetando os demais ciclos. Durante a fase de crescimento, ocorre a absorção dos compostos de fósforo e nitrogênio e liberação de oxigênio dissolvido. Após a sua morte, a biodegradação reconstitui estes elementos ao meio aquático, na formas de nitrogênio e fósforo orgânico, momento onde ocorre também o consumo de oxigênio dissolvido;
- ✓ **Ciclo do fósforo** – O fósforo na sua forma orgânica é transformado em ortofosfato o qual é absorvido pelos fitoplanctons para a sua multiplicação e crescimento;
- ✓ **Ciclo do nitrogênio** – O nitrogênio orgânico é transformado em amônia e nitrato o qual, por sua vez, suprem também as comunidades fitoplanctônicas. Na ausência de oxigênio dissolvido, o nitrato através do processo de denitrificação libera o nitrogênio.
- ✓ **Ciclo do oxigênio dissolvido** – O oxigênio dissolvido interage com todos os demais processos, sendo consumido no processo de oxidação do carbono orgânico, com liberação de CO₂, e da amônia que é transformada em nitrato. A regeneração do oxigênio dissolvido é realizada através do processo de re-aeração na superfície líquida e liberação de oxigênio durante a fase de crescimento da comunidade fitoplanctônica.

- ✓ Demanda bioquímica de oxigênio;
- ✓ Nitrogênio contido na vegetação submersa e dissolvido na água;
- ✓ Fósforo contido na vegetação e dissolvido na água; e,
- ✓ Oxigênio dissolvido.

Nesta nova concepção foram acrescentados três novos sistemas ao módulo EUTRO4 original, conforme esquematizado na Figura 12.1.1/05.

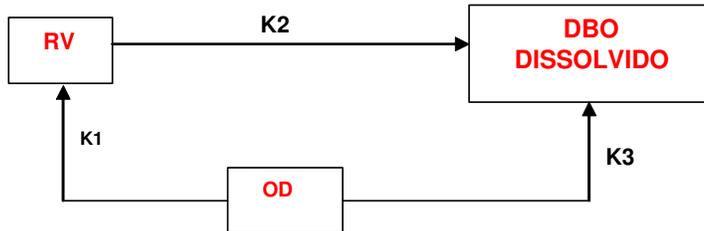
FIGURA 12.1.1/05 – ESTRUTURA DO MÓDULO EUTRO4 MODIFICADO



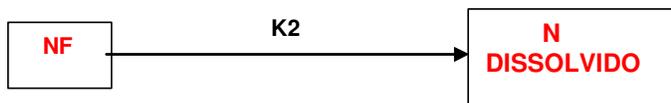
Na Figura 12.1.1/06 são representadas as interações cinéticas dos processos relacionados à degradação da matéria vegetal inundada, as quais foram incorporadas neste novo módulo.

FIGURA 12.1.1/06 – REPRESENTAÇÕES CINÉTICAS DOS SISTEMAS 9, 10 E 11

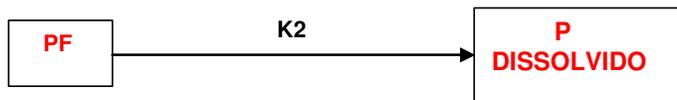
SISTEMA 9



SISTEMA 10



SISTEMA 11



Onde:

- DBO** = demanda bioquímica do oxigênio
- RV** = DBO da matéria vegetal fixa ao solo
- OD** = oxigênio dissolvido
- NF** = nitrogênio fixo na matéria vegetal
- PF** = fósforo fixo na matéria vegetal
- K1** = taxa de biodegradação da DBO fixa
- K2** = taxa de dissolução da DBO fixa
- K3** = taxa de biodegradação da DBO dissolvida

A representação destes processos é descrita por três sistemas interativos:

SISTEMA 9 – Representadas as seguintes cinéticas:

- ✓ A matéria vegetal inundada, fixa ao fundo do reservatório, sofre biodegradação com consumo de oxigênio dissolvido, segundo uma taxa k_1 ;
- ✓ A matéria vegetal inundada, fixa ao solo, sofre dissolução, produzindo uma DBO dissolvida na massa líquida, a uma taxa de transferência k_2 ;

- ✓ A DBO dissolvida, por sua vez, sofre também um processo de biodegradação com consumo de oxigênio, segundo uma taxa k_3 .

O processo de degradação da biomassa inundada, representada pelas parcelas fixa ao solo e dissolvida, são regidas pelos níveis de concentrações de oxigênio dissolvido no corpo hídrico que estabelecem as cinéticas representativas das condições aeróbicas e anaeróbicas.

Desta forma é requerido, como dados de entrada, o fornecimento de dois conjuntos de parâmetros K_1 , K_2 e K_3 representativas das condições aeróbicas e anaeróbicas do corpo hídrico.

SISTEMA 10. O nitrogênio fixo presente na matéria vegetal inundada sofre dissolução, produzindo nitrogênio orgânico na forma dissolvida.

SISTEMA 11. O fósforo fixo na presente na matéria vegetal inundada sofre dissolução, produzindo fósforo orgânico na forma dissolvida.

Onde:

K_1 = taxa de biodegradação da DBO fixa

K_2 = taxa de dissolução da DBO fixa

K_3 = taxa de biodegradação da DBO dissolvida

As parcelas de cargas representativas do nitrogênio e fósforo são definidas com base nas relações estequiométricas entre o nitrogênio-carbono orgânico e o fósforo-carbono orgânico cujos valores são partes dos dados de entrada do modelo matemático.

O modelo adotado apresenta algumas características que devem ser consideradas quando da interpretação de seus resultados, dentre os quais citam-se:

- O modelo considera cada segmento como sendo um reator de mistura completa;
- O processo de biodegradação tem início logo após o seu afogamento, ou seja, não se prevê, portanto, a morte gradual da fitomassa submersa. Desse modo, em algumas situações, as simulações podem conter resultados que sejam mais críticos do que o esperado (por exemplo: déficits de OD), pois a defasagem temporal entre submersão e morte da vegetação contribui para a atenuação da velocidade das alterações da qualidade da água. No entanto, a despeito destas limitações, o modelo utilizado fornece, inequivocamente, as tendências das características da qualidade da água do futuro reservatório.

- Modelo Matemático de Estratificação Térmica

A estratificação térmica deve-se à criação de ambientes lênticos com reduzida capacidade de renovação. Este processo é constatado ao longo da coluna d'água em reservatórios profundos, com o aparecimento de três níveis ou camadas distintas de temperatura, sendo elas: epilímnio, metalímnio e hipolímnio.

O estabelecimento da estratificação é favorecido quando o volume do reservatório é grande, face aos volumes de vazões anuais afluentes. Nestas condições a isoterma é horizontal durante a maior parte do ano e a estratificação é geralmente mantida durante o verão e o outono.

A causa primária da estratificação térmica é a baixa condutividade da água, a limitação da penetração da energia radiante e da luz, e o fato de que o fluxo de vazões no fim da primavera e no verão tende a ser mais quente que superfície do reservatório. Este fluxo quente afluyente permanece na camada superficial do reservatório.

Outro fluxo de calor penetra nas camadas da superfície do reservatório na forma de energia radiante, sendo grande parte absorvida nos primeiros poucos metros, condicionando um aquecimento maior da água situada próximo à superfície, em contraste com aquela situada nas camadas mais profundas que se mantém em temperaturas mais baixas. A água mais aquecida e menos densa tende a permanecer na superfície, absorvendo mais calor, e estabelecendo condições de estratificação.

Por outro lado, o processo de evaporação esfria a camada superficial, provocando o aparecimento de correntes de convecção. Este processo é intensificado durante o período noturno com a ausência da radiação solar e perdas por condutividade. A ação do vento vem intensificar este processo, provocando uma circulação turbulenta na camada do epilimnio.

A destruição da estratificação térmica é acompanhada por uma mistura vertical do reservatório e conseqüente quedas nos índices de qualidade da água.

Na condição estratificada, a camada do hipolimnio apresenta-se como um reator bioquímico isolado da atmosfera, impedindo o processo de re-aeração. Neste ambiente são normalmente observadas condições de anaerobiose e baixos índices de qualidade das águas, com produção indesejável de gases e odores, ocasionalmente com efeitos tóxicos, com uma produção de amônia, redução de sulfeto e formação de metano.

Esta situação mais crítica, observada na camada de fundo, decorre principalmente dos processos de decomposição da matéria orgânica oriunda da vegetação afogada.

Durante a quebra da termoclina ocorre uma mistura das camadas, causando uma rápida deterioração da qualidade da água. Por esta razão, o conhecimento do perfil térmico é essencial para o controle da qualidade da água e da previsão de estruturas hidráulicas de descargas adequadas, visando minimizar os impactos decorrentes destes processos.

- Conceituação Teórica

O modelo matemático adotado baseia-se no processo de absorção e transmissão da radiação solar, convecção devido ao esfriamento da superfície pela evaporação, ação do vento e os fluxos de vazões afluentes e defluentes.

As primeiras verificações do modelo matemático foram desenvolvidas em laboratório, através de modelos físicos desenvolvidos por Huber e Harleman do "Massachusetts Institute of Technology" e posteriormente aplicado em diversos reservatórios com sucesso.

O comportamento térmico do reservatório, normalmente é simulado, descrevendo um ciclo anual completo, de forma a acompanhar as variações sazonais de vazões e condições climáticas, calculando as perdas de calor diárias como uma função das informações meteorológicas.

No processo de modelagem, o reservatório é esquematizado em uma série de elementos horizontais com elevação y , área $A=f(Y)$ e espessura dy . O fluxo de calor penetra na superfície horizontal por radiação, por advecção vertical e por difusão. A equação dinâmica, controlando os processos de transmissão e distribuição da temperatura no corpo d'água, considera em sua formulação a conservação da continuidade e do calor.

A relativa estabilidade conferida aos corpos de água estratificados se deve principalmente às propriedades peculiares da água caracterizadas pelos seus elevados calores latentes de evaporação ($L_v = 590 \text{ cal.g}^{-1}$) e fusão ($L_f = 80 \text{ cal.g}^{-1}$). Deste modo, a água exige o aporte de grandes quantidades de energia para trocar o seu estado físico, conferindo-lhe uma elevada inércia térmica que resulta numa demora em aquecimento e resfriamento.

As principais simplificações da modelagem são:

- ✓ A isoterma no reservatório estratificado é horizontal e o gradiente térmico existe apenas na direção vertical.
- ✓ O transporte de calor devido à mistura provocada pelo fluxo turbulento ocorre somente na região do epilimnio e se limita ao espaço de tempo em que a temperatura induz a desestabilização do perfil de densidade.
- ✓ A radiação solar é transmitida somente na direção vertical.
- ✓ O fluxo de calor não é perdido na interface física entre a massa líquida e o solo junto às margens e fundo do reservatório. As trocas de calor partem da superfície do reservatório, via evaporação e através dos fluxos de vazões derivadas da afluência e da defluência.
- ✓ A densidade e o calor específico e o coeficiente de difusão molecular da água é assumido constante ao longo da simulação.
- ✓ A energia da radiação solar, transmitida para a água e interceptada pelas margens, é distribuída uniformemente sobre a seção transversal e na profundidade de interceptação.

c) Levantamento de Dados

Para o desenvolvimento da modelagem matemática, implementou-se uma fase preparatória de coleta de dados disponíveis e de levantamentos de campo, abrangendo os seguintes tipos de informações:

- Dados Cartográficos e Topográficos
 - Restituição cartográfica digital, proveniente do levantamento aerofotogramétrico desenvolvido pela Aerosul, com curvas de níveis eqüidistantes a cada metro abrangendo a área total a ser ocupada pelo futuro reservatório de Tijuco Alto;
 - Cartas planialtimétricas disponíveis nas escalas 1:50.000 e 1:250.000, elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, onde é identificada a rede de drenagem natural afluente ao reservatório;
 - Imagens de satélite Landsat 7, Sensor ETM, composição colorida em falsa cor, através da combinação dos canais 5, 4 e 3, na escala 1:50.000, obtida na passagem realizada em 02/09/2002.
 - Fotografias aéreas na escala 1:20.000, obtidas através de sobrevôo realizado na área do reservatório, em dezembro de 2004;
 - Levantamentos topobatimétricos de 26 seções transversais realizadas ao longo de todo o percurso do rio Ribeira de Iguape compreendendo a faixa a ser ocupado pelo futuro lago de Tijuco Alto; e

- Mapa de vegetação e uso do solo, elaborado na escala 1:50.000, onde estão assinaladas as áreas ocupadas pelas diversas tipologias vegetais.
- Dados Hidrológicos e Hidráulicos
 - Dados climáticos observados na estação de Cerro Azul operada pelo Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR, onde foram utilizadas séries das normais mensais das variáveis climatológicas.
 - Séries de vazões médias mensais afluentes ao reservatório de Tijuco Alto. Foram considerados os dados de vazões médias mensais geradas para o local do eixo e os dados fluviométricos disponíveis nas estações implantadas na área de influência do reservatório, conforme identificadas no Quadro 12.1.1/20.

QUADRO 12.1.1/20 - REDE DE ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DE INTERESSE

Código ANA	Estação	Curso d'água	OPER.	LAT.	LONG.	A.Dren. (km ²)	Início oper.
81125000	Turvo	Turvo	ANA	24° 45'	49° 20'	392	Ago-45
81135000	Balsa do Cerro Azul	Ribeira do Iguape	ANA	24° 47'	49° 16'	4570	Mai-30
81140000	Cerro Azul	Ponta Grossa	ANA	24° 49'	49° 16'	435	Ago-30
81169500	Catas Altas	Catas Altas	DAEE	24° 37'	49° 03'	652	Jan-72
81200000	Capela da Ribeira	Ribeira do Iguape	ANA	24° 39'	49° 00'	7252	Out-36
81205000	Ribeira	Ribeira do Iguape	DAEE	24° 39'	49° 00'	7465	Mar-62

- Dados de Qualidade das Águas

Compreendem os parâmetros de natureza química, física e bacteriológica disponíveis de campanhas de qualidade da água realizadas na área de influencia do reservatório de Tijuco Alto. No âmbito dos estudos do EIA da UHE Tijuco Alto foram desenvolvidas duas campanhas de amostragens de qualidade das águas no ano de 2004 e 2005 (dezembro/2004 e março/2005), além das campanhas efetuadas nos estudos anteriores.

Neste elenco de informações incluem também os dados monitorados regularmente pela CETESB na estação RIB02500 e séries de campanhas desenvolvidas anteriormente no curso do rio Ribeira e tributários afluentes .

No Quadro 12.1.1/21 são identificados os pontos de monitoramento de qualidade das águas e na Figura 12.1.1/07 a sua localização geográfica.

QUADRO 12.1.1/21 - IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE QUALIDADE DAS ÁGUAS

Ponto	Curso d'água	Local	Coordenadas UTM	
			Norte	Leste
M1	Ribeira	Eixo da barragem	698.581	7.272.182
M2	Criminosas	Próximo a foz no rio Ribeira	686.396	7.270.297
M3	Rocha	1 km a montante da foz no rio Ribeira	689.048	7.268.718
M4	Mato Preto	Próximo a foz no rio Ribeira	681.550	7.259.844
M5	Ribeira	A montante da cidade de Cerro Azul, na balsa	666.629	7.254.621
M6	Rocha	Em frente ao antigo local da mina	688.798	7.265.686
J1	Catas Altas	400 m a montante da foz no rio Ribeira	702.688	7.274.026
J2	Tijuco Alto	400 m a montante da foz no rio Ribeira	698.667	7.274.608
J3	Ribeira	2 km a jusante da cidade de Adrianópolis	703.600	7.270.514
J4	Ribeira	2 km a jusante da cidade de Iporanga	743.910	7.278.681
J5	Ribeira	A montante da cidade de Eldorado, captação de água da SABESP	792.391	7.285.203

- Levantamento de Dados de Fitomassa

Compreendem as informações relativas às diversas tipologias vegetais e quantidades de fitomassa presentes na área de influência do reservatório.

INSERIR A FIGURA 12.1.1/07 A3 -FIGURA COM SEGMENTAÇÃO DO RESERVATÓRIO E PONTOS DE COLETA DE AMOSTRA DE ÁGUA

Nos trabalhos de levantamento de campo procurou-se identificar dois níveis distintos de graus de sucessão vegetal, que são o estágio inicial e o estágio médio, em números proporcionais de parcelas para ambos.

Foram consideradas unidades amostrais representativas distribuídas em toda a extensão da ADA, bem como entre a estrada e o rio Ribeira, com dimensões de 10 x 10 m, totalizando para cada uma 100 m² para a estimativa de fitomassa pelo método direto.

Nas formações florestais em estágio médio de regeneração natural foram consideradas 10 unidades amostrais do método destrutivo, e nas formações florestais em estágio médio de regeneração natural foram instaladas 7 unidades ou parcelas.

A localização das unidades amostrais são apresentadas no Quadro 12.1.1/22.

QUADRO 12.1.1/22 - UNIDADES AMOSTRAIS DO MÉTODO DESTRUTIVO

Amostra nº	Estágio sucessional	Localização (Coordenadas UTM)	
		Norte	Leste
01	Estágio Médio de Regeneração	688.433	7.267.174
02	Estágio Inicial de Regeneração	688.702	7.266.475
03	Estágio Médio de Regeneração	692.284	7.269.317
04	Estágio Médio de Regeneração	692.909	7.268.558
05	Estágio Médio de Regeneração	695.501	7.268.416
06	Estágio Médio de Regeneração	693.239	7.268.904
07	Estágio Médio de Regeneração	695.285	7.268.412
08	Estágio Inicial de Regeneração	696.016	7.268.365
09	Estágio Médio de Regeneração	696.656	7.268.680
10	Estágio Médio de Regeneração	692.474	7.268.786
11	Estágio Médio de Regeneração	692.260	7.269.461
12	Estágio Inicial de Regeneração	688.660	7.268.081
13	Estágio Médio de Regeneração	688.996	7.268.610
14	Estágio Inicial de Regeneração	692.916	7.268.464
15	Estágio Inicial de Regeneração	688.429	7.266.991
16	Estágio Inicial de Regeneração	688.626	7.266.397
17	Estágio Inicial de Regeneração	690.730	7.268.343

No Desenho MA136.00.49-DE.01 e MA136.00.49-DE.02 (Mapa de Vegetação e Uso do Solo) é apresentado o mapa de cobertura vegetal do solo na escala 1:50.000, onde estão indicadas as legendas representativas das diferentes tipologias vegetais presentes na área do reservatório.

d) Modelagem Matemática

A seguir são apresentadas as fases relativas à montagem dos dados de entrada do modelo de simulação, bem como os processos de calibragem e aplicação de cenários alternativos de enchimento do reservatório.

- Segmentação do Reservatório

No processo de modelagem, o reservatório é representado por uma seqüência de células horizontais interligadas através de elementos de canais por onde veiculam as vazões e os constituintes químicos e bioquímicos.

Cada segmento é representado como um reator homogêneo de mistura completa, ambiente onde processam as cinéticas e as transformações dos componentes limnológicos presentes no meio líquido e aqueles decorrentes da incorporação e biodegradação da biomassa

inundada.

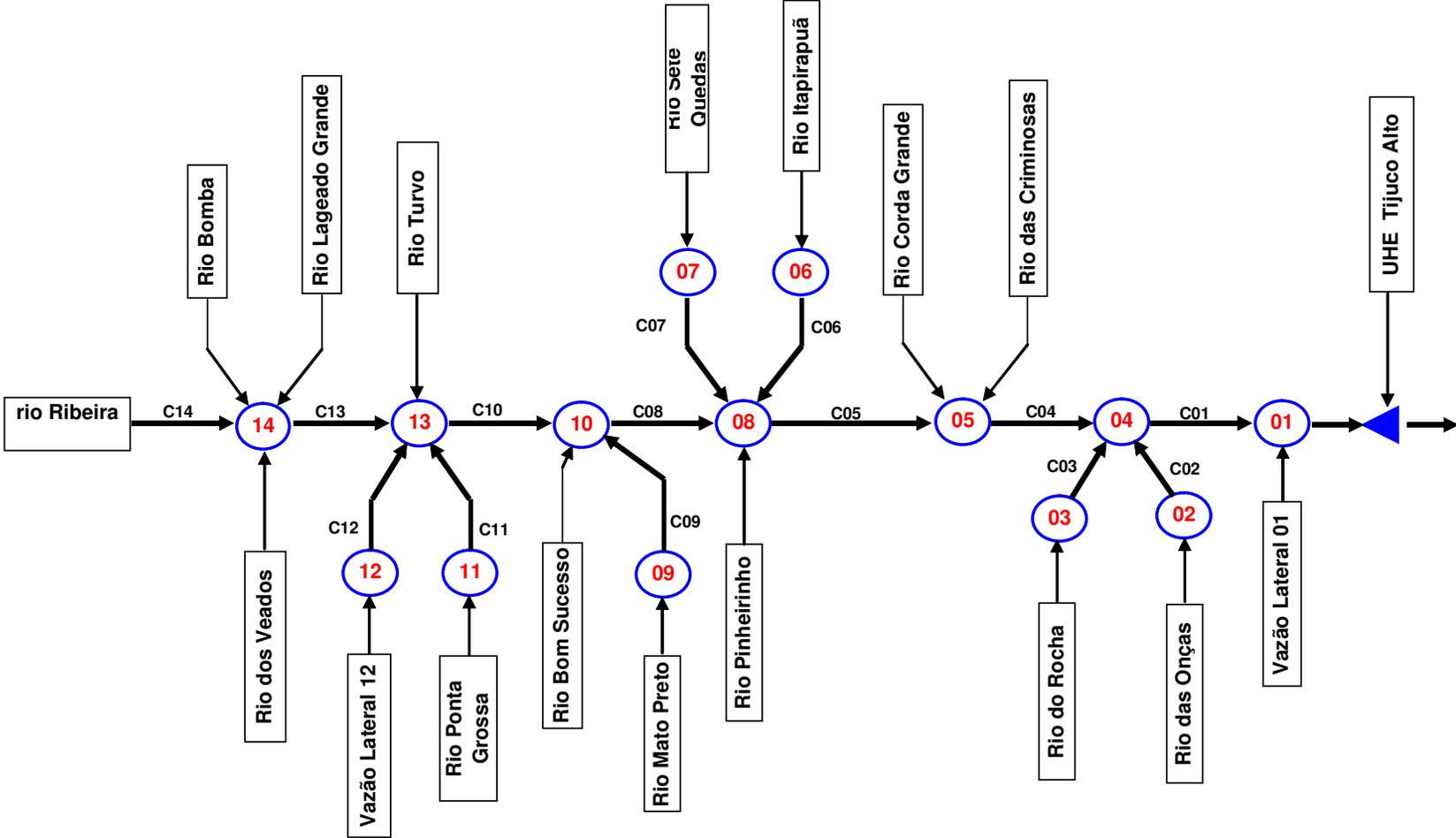
No processo de segmentação do reservatório, foram considerados os seguintes aspectos:

- ✓ Conformação geral do lago a ser formado pela implantação do reservatório, considerando-se o nível operacional máximo normal na cota 290 m;
- ✓ A presença de tributários afluentes ao reservatório, onde se observa a formação de braços remansados. Neste processo, foram considerados 13 tributários afluentes ao reservatório, que são:
 - Na margem direita: rio das Onças, rio do Rocha, rio Pinheirinho, rio Mato Preto, rio Bom Sucesso, rio Ponta Grossa e rio dos Veados.
 - Na margem esquerda: rio das Criminosas, rio Corda Grande, rio Itapirapuã, rio Sete Quedas, rio Turvo e Lageado Grande.
- ✓ Localização dos pontos de monitoramento de qualidade das águas. Foram considerados onze pontos de coleta, sendo cinco no curso do rio Ribeira de Iguape e seis nos tributários afluentes;
- ✓ Definição do número de segmentos, considerando-se as características do regime hidráulico atuantes neste curso d'água e as limitações inerentes ao processo de modelagem que deverão ser compatíveis com os níveis de informações disponíveis e o grau de detalhamento desejado na modelagem.

No processo de segmentação, o reservatório foi dividido em 14 parcelas de áreas, sendo sete no corpo principal do rio Ribeira e sete representativos dos braços remansados dos tributários afluentes.

A conexão entre os segmentos é realizada através de 13 canais (C01 a C13) virtuais de escoamento, conforme esquema topológico apresentado na Figura 12.1.1/08.

FIGURA 12.1.1/08 - Esquema Topológico do Reservatório de Tijuco Alto



NA Figura 12.1.1/07 é apresentada a área do reservatório e sua discretização em parcelas de segmentos.

- Modelagem Hidráulica
 - Dados Hidráulicos do Reservatório

A definição dos dados de entrada do modelo hidráulico baseou-se fundamentalmente nos elementos geométricos e hidráulicos extraídos da restituição aerofotogramétrica e dos levantamentos topobatimétricos de seções transversais, disponibilizadas em formato DWG.

Para a definição destes parâmetros utilizaram-se os recursos disponíveis do software AutoCAD e de programas utilitários de tratamento numérico, que permitiu a compilação e a formatação dos dados de entrada da modelagem.

Como insumo de entrada, o modelo hidráulico admite dados característicos de cada segmento considerado na modelagem do reservatório, representado através de pares de pontos relacionando à cota do nível d'água e a respectiva área da superfície líquida ocupada.

Os valores das relações cota-área-volume do espelho d'água são apresentados no Quadro 12.1.1/23

Os canais virtuais, interligando os vários segmentos, são retratados através de uma variável denominada condutância, definida também a partir de pares de pontos relacionadas à cota do nível d'água. A estimativa destes dados é realizada através da seguinte expressão:

$$K_{ij} = A_{ij} * RH_{ij}^{2/3} / (n * \Delta X_{ij}^{1/2})$$

Onde:

A_{ij} = área da seção transversal do canal virtual em função da cota do N.A., em m²;

RH_{ij} = raio hidráulico para uma dada cota, em m;

n = coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning e

ΔX_{ij} = distância entre os centros dos segmentos i e j em m.

QUADRO 12.1.1/23 – CURVAS COTA-ÁREA-VOLUMES DOS SEGMENTOS

Cota (m)	Segmento 01		Segmento 02		Segmento 03		Segmento 04		Segmento 05	
	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)
165	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
170	0,40	0,67	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-
175	0,89	3,81	-	-	-	-	0,20	0,33	-	-
180	1,22	9,05	-	-	-	-	0,87	2,81	0,00	0,00
185	1,60	16,07	-	-	0,00	0,00	1,28	8,16	0,26	0,44
190	1,95	24,91	-	-	0,02	0,06	1,81	15,86	0,55	2,43
195	2,25	35,39	0,00	0,00	0,05	0,24	2,21	25,89	1,03	6,33
200	2,54	47,36	0,01	0,02	0,09	0,57	2,63	37,97	1,52	12,66
205	2,85	60,84	0,03	0,12	0,12	1,09	2,98	51,99	1,87	21,13
210	3,17	75,90	0,05	0,33	0,17	1,82	3,29	67,67	2,20	31,29
215	3,48	92,53	0,08	0,65	0,24	2,85	3,57	84,83	2,51	43,07
220	3,77	110,67	0,10	1,10	0,36	4,35	3,86	103,41	2,84	56,43
225	4,05	130,22	0,13	1,69	0,50	6,47	4,15	123,43	3,18	71,48
230	4,32	151,14	0,17	2,44	0,67	9,38	4,41	144,83	3,51	88,21
235	4,56	173,33	0,20	3,36	0,83	13,13	4,65	167,48	3,83	106,57
240	4,80	196,72	0,24	4,47	0,99	17,69	4,89	191,33	4,15	126,52
245	5,04	221,31	0,29	5,80	1,15	23,03	5,13	216,36	4,48	148,10
250	5,27	247,07	0,34	7,36	1,30	29,16	5,36	242,58	4,83	171,38
255	5,49	273,97	0,40	9,20	1,49	36,15	5,59	269,97	5,17	196,38
260	5,70	301,95	0,46	11,36	1,69	44,09	5,82	298,51	5,50	223,05
265	5,91	330,97	0,54	13,86	1,88	52,99	6,04	328,16	5,84	251,39
270	6,12	361,04	0,62	16,74	2,07	62,84	6,26	358,91	6,18	281,43
275	6,33	392,17	0,70	20,03	2,27	73,67	6,49	390,79	6,54	313,23
280	6,55	424,37	0,79	23,75	2,46	85,48	6,71	423,79	6,89	346,81
285	6,76	457,64	0,87	27,90	2,66	98,29	6,94	457,91	7,22	382,09
290	6,97	491,98	0,95	32,47	2,88	112,15	7,16	493,15	7,56	419,04
295	7,19	527,38	1,04	37,47	3,12	127,14	7,38	529,50	7,90	457,66
300	7,40	563,84	1,14	42,93	3,37	143,34	7,61	566,99	8,24	498,01

(continua...)

QUADRO 12.1.1/23 – CURVAS COTA-ÁREA-VOLUMES DOS SEGMENTOS

(...continuação)

Cota (m)	Segmento 06		Segmento 07		Segmento 08		Segmento 09		Segmento 10	
	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)
195	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-	-	-
200	-	-	-	-	0,08	0,13	-	-	-	-
205	-	-	-	-	0,26	0,94	-	-	-	-
210	-	-	-	-	0,55	2,93	-	-	-	-
215	-	-	0,00	0,00	0,82	6,34	-	-	-	-
220	0,00	0,00	0,00	0,01	1,04	10,97	-	-	-	-
225	0,01	0,02	0,01	0,05	1,37	16,96	-	-	-	-
230	0,02	0,09	0,04	0,18	1,73	24,68	-	-	0,00	0,00
235	0,03	0,22	0,09	0,50	2,02	34,06	0,00	0,00	0,10	0,17
240	0,07	0,47	0,21	1,24	2,30	44,87	0,02	0,03	0,32	1,16
245	0,11	0,92	0,32	2,57	2,60	57,11	0,08	0,26	0,59	3,39
250	0,15	1,56	0,45	4,48	2,90	70,87	0,19	0,92	0,91	7,13
255	0,20	2,44	0,57	7,02	3,22	86,17	0,38	2,32	1,25	12,53
260	0,27	3,62	0,72	10,22	3,53	103,03	0,52	4,57	1,46	19,32
265	0,34	5,15	0,88	14,20	3,85	121,45	0,62	7,41	1,67	27,15
270	0,41	7,02	1,05	19,02	4,17	141,49	0,72	10,75	1,88	36,03
275	0,49	9,28	1,23	24,73	4,51	163,19	0,82	14,60	2,10	45,98
280	0,58	11,96	1,43	31,37	4,88	186,67	0,93	18,98	2,35	57,11
285	0,67	15,08	1,64	39,03	5,26	212,02	1,03	23,87	2,60	69,47
290	0,76	18,63	1,87	47,79	5,64	239,27	1,14	29,29	2,87	83,16
295	0,87	22,68	2,12	57,76	6,03	268,44	1,25	35,27	3,17	98,26
300	0,96	27,25	2,40	69,04	6,43	299,59	1,37	41,81	3,49	114,91
Cota (m)	Segmento 11		Segmento 12		Segmento 13		Segmento 14			
	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)		
250	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-		
255	-	-	-	-	0,02	0,04	-	-		
260	-	-	0,00	0,00	0,28	0,67	-	-		
265	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	3,02	-	-		
270	0,01	0,01	0,04	0,09	1,13	7,52	0,00	0,00		
275	0,02	0,08	0,11	0,45	1,69	14,52	0,40	0,67		
280	0,06	0,28	0,19	1,19	2,17	24,12	0,94	3,93		
285	0,16	0,82	0,28	2,35	2,62	36,07	1,39	9,73		
290	0,34	2,04	0,38	3,97	3,05	50,24	2,20	18,63		
295	0,55	4,24	0,49	6,13	3,51	66,63	2,94	31,46		
300	0,83	7,65	0,61	8,86	4,02	85,44	3,91	48,54		

Integrando os segmentos participantes do processo de modelagem resulta a curva cota-área-volume do reservatório de Tijuco Alto conforme apresentado no Quadro 12.1.1/24.

QUADRO 12.1.1/24 - CURVA COTA-ÁREA-VOLUME DO RESERVATÓRIO

Cota (m)	Área (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)
165	0,00	0,00
170	0,40	0,67
175	1,09	4,25
180	2,09	12,05
185	3,15	25,05
190	4,33	43,67
195	5,54	68,28
200	6,86	99,23
205	8,12	136,65
210	9,44	180,53
215	10,71	230,88
220	11,97	287,56
225	13,40	350,96
230	14,87	421,60
235	16,33	499,55
240	17,99	585,32
245	19,79	679,75
250	21,71	783,46
255	23,80	897,18
260	25,96	1.021,52
265	28,24	1.156,97
270	30,66	1.304,17
275	33,71	1.465,01
280	36,93	1.641,55
285	40,10	1.834,07
290	43,78	2.043,70
295	47,56	2.271,97
300	51,77	2.520,22

- Definição das Vazões Afluentes ao Reservatório

As vazões afluentes ao reservatório foram definidas a partir das vazões médias mensais de longo termo, tendo por base dados das séries históricas registradas nas estações fluviométricas.

Para os cursos d'água afluentes lateralmente ao reservatório, foram utilizados os dados disponíveis nas seguintes estações fluviométricas: Costas, no rio Santana; Turvo, no rio Turvo; Cerro Azul, no rio Ponta Grossa, Catas Altas, no rio catas Altas, Balsa do Cerro Azul e Capela da Ribeira no rio Ribeira de Iguape, conforme identificadas no Desenho MA136.00.45-DE.01 (Sub-bacias hidrográficas contribuintes ao reservatório de Tijuco Alto).

Os valores de vazões apurados nestes cursos d'água, expressos através de seus valores específicos em l/s/km, foram irradiados para os cursos tributários vizinhos afluentes, compondo desta forma as séries de vazões médias mensais laterais afluente ao reservatório.

As vazões afluentes a montante do reservatório, foram compostas a partir das vazões médias mensais definidas para o eixo de Tijuco Alto, subtraídas das vazões laterais ao reservatório, de forma a manter a equação da continuidade.

No Quadro 12.1.1/25 estão relacionados os cursos d'água considerados na modelagem, onde são identificados o número dos segmentos e a respectiva área de drenagem contribuinte.

QUADRO 12.1.1/25 – CURSOS D'ÁGUAS AFLUENTES AO RESERVATÓRIO DE TIJUCO ALTO

Curso d'água	Área (km ²)	Segmentos do Reservatório
Vazões laterais 01	52,4	01
Rio das Onças + Vazões laterais 02	52,3	02
Rio do Rocha	106,0	03
Rio das Criminosas	98,3	05
Rio Pinheirinho + Vazões laterais 08	60,9	08
Rio Corda Grande	141,9	05
Rio Itapirapuã	522,9	06
Rio Sete Quedas	112,8	07
Rio Mato Preto	123,1	09
Rio Bom Sucesso	97,1	10
Rio Ponta Grossa	463,5	11
Rio Turvo	424,0	13
Ribeirão dos Veado	47,9	14
Rio Lageado Grande + Vazões laterais 14	95,5	14
Rio Bomba	142,6	14
Rio Ribeira – Montante	3798,8	14

No Quadro 12.1.1/26 são discriminados os dados de vazões médias mensais afluentes ao reservatório.

QUADRO 12.1.1/26 – VAZÕES MÉDIAS MENSAS AFLUENTES (m³/S)

Curso d'água	Curso d'água											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Laterais 01	1,01	0,95	0,82	0,68	0,71	0,74	0,67	0,62	0,72	0,79	0,72	0,76
Laterais 02	1,01	0,95	0,82	0,68	0,71	0,74	0,67	0,62	0,72	0,79	0,72	0,76
Rocha	2,03	1,92	1,65	1,37	1,43	1,50	1,36	1,25	1,45	1,60	1,45	1,53
Criminosas	1,89	1,78	1,53	1,27	1,33	1,40	1,26	1,16	1,34	1,49	1,35	1,42
Laterais 08	1,17	1,10	0,95	0,79	0,82	0,86	0,78	0,72	0,83	0,92	0,83	0,88
Corda Grande	2,72	2,57	2,21	1,84	1,92	2,02	1,82	1,68	1,94	2,15	1,94	2,05
Itapirapuã	10,03	9,48	8,15	6,77	7,08	7,43	6,72	6,19	7,14	7,91	7,16	7,56
Sete Quedas	2,16	2,04	1,76	1,46	1,53	1,60	1,45	1,34	1,54	1,71	1,54	1,63
Mato Preto	2,36	2,23	1,92	1,59	1,67	1,75	1,58	1,46	1,68	1,86	1,69	1,78
Bom Sucesso	1,86	1,76	1,51	1,26	1,31	1,38	1,25	1,15	1,33	1,47	1,33	1,41
Ponta Grossa	8,89	8,40	7,22	6,00	6,27	6,58	5,96	5,49	6,33	7,01	6,35	6,71
Turvo	8,14	7,68	6,61	5,49	5,74	6,02	5,45	5,02	5,79	6,41	5,80	6,13
Veado	0,92	0,87	0,75	0,62	0,65	0,68	0,62	0,57	0,65	0,72	0,66	0,69
Laterais 14	1,83	1,73	1,49	1,24	1,29	1,36	1,23	1,13	1,30	1,44	1,31	1,38
Bomba	2,74	2,58	2,22	1,85	1,93	2,02	1,83	1,69	1,95	2,16	1,95	2,06
Ribeira Mont.	77,54	81,43	70,03	54,93	58,79	60,60	61,34	53,48	64,03	67,52	59,04	61,04

- Calibragem do Modelo Hidráulico

A calibragem do modelo hidráulico baseou-se nos resultados obtidos nos estudos de remanso, onde foram definidas de forma paramétrica, as linhas d'água ao longo do reservatório, resultantes de diversas condições de vazões afluentes.

A aferição é realizada através do ajuste dos valores da condutância que controla o fluxo entre os segmentos adjacentes, onde através de um processo de tentativas, obtém-se a melhor aderência entre as respectivas linhas d'água obtidas através da aplicação do modelo hidráulico e as resultantes do estudo de remanso.

No processo de calibragem procurou-se reproduzir as condições básicas representativas das fases de início de enchimento e operação do reservatório, ou seja:

- ✓ Na primeira situação, considerou-se o rio Ribeira em condições naturais, onde foi reproduzida, em regime permanente, a linha d'água decorrente de uma vazão de 101 m³/s, correspondente à média de longo período definida para o local do eixo da UHE de Tijuco Alto, e
- ✓ Considerando a implantação do reservatório de Tijuco alto, foram aferidas as linhas d'água avaliadas nos estudos de remanso, considerando o reservatório na cota 290,000 e vazões afluentes de 101 m³/s no local do eixo de Tijuco Alto.
- Modelo de Qualidade da Água

Na montagem dos dados de entrada foram definidos os seguintes tipos de informações:

- ✓ Condições de contorno para as variáveis bioquímicas;
- ✓ Dados hidrológicos e climatológicos;
- ✓ Dados relativos à densidade de carbono biodegradável de cada segmento;
- ✓ Constantes das equações cinéticas relativas aos ciclos dos nutrientes e do oxigênio dissolvido e
- ✓ Taxas de biodegradação da fitomassa inundada.

As variáveis temporais relativas aos níveis d'água e o fluxo de vazões entre segmentos são supridas pelo modelo de simulação hidráulico.

- Variáveis Bioquímicas

Como condição de contorno utilizaram-se dados obtidos das duas campanhas de qualidade da água desenvolvidas respectivamente em dezembro de 2004 e março de 2005, conforme explicitado no Quadro 12.1.1/27.

QUADRO 12.1.1/27 - CAMPANHAS DE AMOSTRAGENS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Parâmetro	M1		M2		M3		M4	
	Data		Data		Data		Data	
	dez/04	Mar/05	dez/04	mar/05	dez/04	mar/05	dez/04	mar/05
Temperatura da Água (°C)	25,98	23,90	23,93	22,67	21,60	19,83	22,27	20,97
Temperatura do Ar (°C)	29,60	25,90	29,60	24,10	24,80	21,00	22,40	22,90
PH	7,90	8,12	10,20	7,75	8,01	8,03	10,30	8,03
Oxigênio Dissolvido (mg/l)	8,12	7,87	8,45	8,72	10,53	8,70	8,39	8,96
DBO ₅ (mg/l)	0,86	1,86	-	-	-	-	-	-
Fosfato Orgânico (mg/l)	0,003	0,0018	0,001	0,0016	0,00	0,000	0,00	0,0019
Fosfato Orto (mg/l)	0,027	0,0162	0,009	0,0144	0,00	0,000	0,00	0,0171
Nitrogênio Amoniacal (mg/l)	0,003	0,0003	0,000	0,0005	0,000	0,0005	0,007	0,0008
Nitrogênio Nitrato (mg/l)	0,88	1,2	0,09	0,2	2,19	2,4	1,25	1,7
Nitrogênio Orgânico (mg/l)	0,550	0,633	0,500	0,667	0,583	0,717	0,567	0,783

Parâmetro	M5		M6		J1		J2	
	Data		Data		Data		Data	
	Dez/04	Mar/05	dez/04	mar/05	dez/04	Mar/05	dez/04	mar/05
Temperatura da Água (°C)	21,80	22,00	20,90	19,34	23,88	22,00	21,93	20,50
Temperatura do Ar (°C)	21,40	20,50	23,70	21,20	24,30	22,00	24,50	21,10
PH	9,21	7,63	7,92	7,79	7,79	7,83	7,65	7,76
Oxigênio Dissolvido (mg/l)	7,83	8,48	9,56	8,41	9,16	8,23	9,41	9,01
DBO ₅ (mg/l)	-	-	-	-	0,85	2,54	1,27	2,55
Fosfato Orgânico (mg/l)	0,00	0,0008	-	-	0,00	0,001	0,001	0,0024
Fosfato Orto (mg/l)	0,000	0,0072	-	-	0,00	0,009	0,009	0,0216
Nitrogênio Amoniacal (mg/l)	0,004	0,0008	-	-	0,007	0,0006	0,003	0,0004
Nitrogênio Nitrato (mg/l)	1,03	1,0	-	-	0,23	0,3	2,47	2,3
Nitrogênio Orgânico (mg/l)	0,467	0,767	-	-	0,733	0,817	0,600	0,633

Parâmetro	J3		J4		J5	
	Data		Data		Data	
	dez/04	mar/05	dez/04	mar/05	dez/04	Mar/05
Temperatura da Água (°C)	26,07	25,30	25,17	24,50	24,60	24,20
Temperatura do Ar (°C)	28,10	26,50	26,80	25,60	24,40	24,10
PH	10,34	7,96	9,82	7,84	9,15	7,67
Oxigênio Dissolvido (mg/l)	8,26	8,86	8,24	8,34	7,97	8,32
DBO ₅ (mg/l)	1,34	2,49	-	-	-	-
Fosfato Orgânico (mg/l)	0,00	0,0021	0,00	0,001	0,00	0,0014
Fosfato Orto (mg/l)	0,00	0,0189	0,00	0,009	0,00	0,0126
Nitrogênio Amoniacal (mg/l)	0,000	0,0007	0,006	0,0011	0,000	0,0007
Nitrogênio Nitrato (mg/l)	0,66	1,2	0,83	1,2	1,26	1,6
Nitrogênio Orgânico (mg/l)	0,650	0,600	0,567	0,650	0,700	0,617

Para os cursos d'água afluentes ao reservatório, não contemplados nas campanhas de qualidade das águas, os valores dos parâmetros de entrada do modelo foram definidos a partir dos dados disponíveis de bacias vizinhas.

- Densidade de Carbono Biodegradável

A estimativa da densidade de carbono biodegradável, expressa em kg/m² foi realizada para cada parcela de área de segmento, onde foram consideradas as tipologias vegetais apresentadas no Quadro 12.1.1/28.

QUADRO 12.1.1/28 – TIPOLOGIAS CONSIDERADAS NA ESTIMATIVA DO CARBONO BIODEGRADÁVEL

Legendas Temáticas	Tipologia
Usos Agropecuários e Silviculturais	
- Agropecuária	Ag
- Mosaicos de tipos de uso (pastagem + agricultura + vegetação em estágio inicial a médio de regeneração)	M
- Reflorestamento	R
Formações Vegetais	
- Vegetação em estágio inicial de regeneração	Vi
- Vegetação em estágio inicial a médio de regeneração	Vim
- Vegetação em estágio médio de regeneração	Vm
- Vegetação em estágio médio a avançado de regeneração	Vma
- Vegetação em estágio avançado de regeneração	Va
Usos Urbanos	
	Pi
Áreas ocupadas pelos corpos de água	Rio

A partir das áreas relativas a cada tipologia, foram definidas as densidades de carbono biodegradável para cada segmento, implementadas através da seguinte sistemática:

- ✓ Determinação do potencial de fitomassa, expresso em toneladas por hectare, discretizada por tipologia vegetal e tipo de matéria orgânica representadas pelas seguintes parcelas: serapilheira, galho, folha e casca. Dentro de cada tipologia vegetal consideraram-se ainda as subdivisões representativas do estrato arbóreo e estrato arbustivo. No Quadro 12.1.1/29 são apresentadas, para cada segmento, as parcelas de áreas abrangidas pelas diversas tipologias.

QUADRO 12.1.1/29 - ÁREA ABRANGIDAS PELAS TIPOLOGIAS CONSIDERADAS

Segmento	Áreas abrangidas pelas Tipologias em hectares								
	Rio	Ag	Pi	M	Vi	Vim	R + Vim	Vm	Vma
1	61,06	0,00	0,00	170,63	111,55	397,31	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	26,86	55,35	0,00	0,00	31,96
3	74,17	38,74	0,00	0,00	294,58	337,89	0,00	0,00	23,68
4	0,00	29,79	0,00	0,00	121,75	159,54	25,50	0,00	0,00
5	62,00	20,89	0,00	0,00	0,00	546,89	1,09	90,03	103,25
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,67	0,00	0,00	85,79
7	0,00	0,00	0,00	86,97	0,00	1,38	0,54	0,00	150,71
8	68,87	3,82	0,00	0,00	0,00	149,10	50,84	0,41	371,22
9	0,00	4,00	0,00	0,00	0,00	132,75	0,00	0,00	0,06
10	67,87	0,00	0,00	74,73	0,00	83,96	0,00	0,00	123,52
11	12,19	3,83	4,47	61,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	2,30	0,00	58,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26
13	93,54	5,50	0,00	280,50	0,00	0,00	0,00	0,00	24,43
14	129,76	5,70	0,00	257,26	4,17	0,96	0,00	0,00	0,00
Total	569,45	114,57	4,47	990,13	558,91	1875,80	77,96	90,44	914,88

- ✓ A partir dos dados do potencial de fitomassa, foi definida para cada tipologia a quantidade de carbono presente em cada tipo de matéria orgânica (serapilheira, galho, folha e casca), aplicando-se as porcentagens respectivas de cada substrato. Nos cálculos, desconsiderou-se a matéria vegetal integrante do tronco, tendo em vista as baixas taxas de biodegradação normalmente verificadas neste substrato. No Quadro 12.1.1/30 são apresentadas as densidades respectivas de cada substrato vegetal.

QUADRO 12.1.1/30 - DENSIDADE DE MATÉRIA ORGÂNICA

Segmento	Densidade em Toneladas por Hectare				
	Serapilheira	Galhos	Folhas	Casca	MO Solo
1	9,515	21,618	4,496	0,184	0,62
2	10,720	27,185	5,740	1,224	0,62
3	8,886	20,637	4,779	0,283	0,62
4	9,547	22,697	5,583	0,460	0,62
5	9,622	24,314	5,369	1,043	0,62
6	11,482	35,077	7,568	3,455	0,62
7	11,159	31,735	6,794	2,510	0,62
8	10,020	29,410	6,374	2,577	0,62
9	10,067	22,957	5,052	0,196	0,62
10	8,801	23,562	5,009	1,453	0,62
11	7,790	17,974	4,694	0,150	0,62
12	9,983	22,827	5,108	0,208	0,62
13	7,903	18,604	4,017	0,372	0,62
14	6,839	15,578	3,376	0,132	0,62

- ✓ Com base na massa total de carbono presente em cada tipologia, foram estimadas as quantidades de carbono biodegradável presentes em cada tipo de matéria orgânica. Os parâmetros e as taxas de biodegradação foram estimados com base em ensaios desenvolvidos em laboratório considerando-se os substratos representativos de cada parcela vegetal presente na área de inundação.
- ✓ Considerando-se a tipologia vegetal presente em cada segmento, definiu-se a densidade de carbono biodegradável em cada parcela de área. Os resultados finais são apresentados no Quadro 12.1.1/31.

QUADRO 12.1.1/31 – DENSIDADE DE CARBONO BIODEGRADÁVEL

Segmento	Área (ha)	Carbono Biodegradável (kg/m ²)
01	740,55	0,192
02	114,16	0,225
03	769,05	0,189
04	336,58	0,205
05	824,14	0,210
06	96,46	0,274
07	239,60	0,253
08	644,26	0,240
09	136,81	0,202
10	350,08	0,204
11	82,35	0,177
12	60,72	0,202
13	403,98	0,175
14	397,86	0,156

- Constantes das Equações Cinéticas

As constantes das equações cinéticas relativas aos ciclos dos nutrientes e do oxigênio dissolvido adotado na modelagem são apresentadas no Quadro 12.1.1/32.

QUADRO 12.1.1/32 – CONSTANTES DAS EQUAÇÕES CINÉTICAS

CONSTANTE	DESCRIÇÃO	VALOR	UNIDADE
K1320C	Coeficiente de nitrificação a 20 °C	0,10	dia ⁻¹
K1320T	Coeficiente de temperatura para k1320C	1,085	
KNIT	Constante meia-saturação da nitrificação limitada por oxigênio	2,0	mg O ₂ L ⁻¹
K140C	Coeficiente de desnitrificação a 20 °C	0,09	dia ⁻¹
K140T	Coeficiente de temperatura para K140C	1,08	
KNO3	Constante meia-sat. da desnitrificação limitada por oxigênio	0,10	mg O ₂ L ⁻¹
KIC	Coef. Crescimento fitoplâncton (na saturação) à 20 °C	2,0	dia ⁻¹
KIT	Coeficiente de temperatura para KIC	1,06	
XKC	Coeficiente de extinção da clorofila	0,017	m ² /mg chla
PHIMX	Constante rendimento fotossintético máximo em função da luz	720	mg C/mol fóton
KMNGI	Constante meia-saturação N para o crescimento fitoplâncton	0,025	mg N L ⁻¹
KMPGI	Constante meia-saturação P para o crescimento fitoplâncton	0,001	mg PO ₄ L ⁻¹
NCRB	Relação nitrogênio-carbono no fitoplâncton	0,250	
PCRB	Relação fósforo-carbono no fitoplâncton	0,025	
KIRC	Coef. Respiração endógena do fitoplâncton a 20 °C	0,125	dia ⁻¹
KIRT	Coeficiente de temperatura para KIRC	1,045	
KID	Coeficiente de morte não predatória do fitoplâncton	0,020	dia ⁻¹
KPZDC	Coeficiente de decomposição do fitoplâncton no sedimento a 20 °C	0,020	dia ⁻¹
KPZDT	Coeficiente de temperatura para KPZDDC	1,08	
KDC	Coeficiente de desoxigenação (BOD) a 20 °C	0,10	dia ⁻¹
KDT	Coeficiente de temperatura	1,05	
KDSC	Coef. decomposição do CBOD no sedimento a 20 °C	4,23	dia ⁻¹
KDST	Coeficiente de temperatura	1,08	
KBOD	Constante meia-saturação do consumo C limitado por oxigênio	0,00	mg O ₂ L ⁻¹
OCRB	Relação oxigênio-carbono no fitoplâncton	2,67	
K2	Coef. de reaeração a 20° C (para todo corpo d'água)	0,00	dia ⁻¹
K1013C	Coef. mineralização NOD a 20°C	0,075	dia ⁻¹
K1013T	Coeficiente de temperatura para K1013C	1,08	
KONDC	Coef. decomposição nitrogênio orgânico no sedimento	0,0004	dia ⁻¹
KONDT	Coeficiente de temperatura	1,08	
K58C	Coef. mineralização POD a 20°C	0,22	dia ⁻¹
K58T	Coeficiente de temperatura para K58C	1,08	
KOPDC	Coef. decomposição do fósforo orgânico no sedimento	0,0004	dia ⁻¹
KOPDT	Coeficiente de temperatura	1,08	

As constantes das equações cinéticas relativas ao processo de biodegradação da fitomassa afogada são apresentadas no Quadro 12.1.1/33. Os valores das constantes cinéticas foram baseados em resultados dos ensaios de consumo de matéria orgânica desenvolvida em laboratório.

QUADRO 12.1.1/33 - TAXAS DE BIODEGRADAÇÃO DA FITOMASSA INUNDADA

DESCRIÇÃO	VALOR	UNIDADE
Taxa de solubilização – condição aeróbica	0,749	1/dia
Taxa de solubilização – condição anaeróbica	0,370	1/dia
Taxa de oxidação material particulado - cond. aeróbica	0,251	1/dia
Taxa de oxidação material particulado - cond. anaeróbica	0,443	1/dia
Taxa de oxidação material dissolvido - cond. aeróbica	0,015	1/dia
Taxa de oxidação material dissolvido - cond. anaeróbica	0,003	1/dia
Razão nitrogênio – carbono	0,0287	mg N/mg C
Razão fósforo – carbono	0,0016	mg P/mg C

- Modelo de Estratificação Térmica

A seguir são apresentadas as informações utilizadas na composição dos dados de entrada do modelo de estratificação térmica que inclui as características físicas e hidráulicas do reservatório e informações de natureza hidrometeorológica.

- Características do Reservatório

O reservatório da UHE Tijuco Alto deverá operar com alocação de volume entre as cotas 285 m (N.A. mínimo) e 290 m (N.A. máximo normal) o que perfaz um deplecionamento de 5 m e um volume útil de $210 \times 10^6 \text{ m}^3$. No Quadro 12.1.1/34 são resumidas as características físicas e operacionais do reservatório.

QUADRO 12.1.1/34 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E OPERACIONAIS DO RESERVATÓRIO

PARÂMETRO	COTA (m)	ÁREA (km ²)	VOLUME (m ³ *10 ⁶)
Cota da soleira da tomada d'água	272,000	31,88	1.368,51
Cota da soleira do vertedor	286,000	40,84	1.876,00
Cota do nível d'água mínimo	285,000	40,10	1.834,07
Cota do nível d'água máximo normal	290,000	43,78	2.043,70
Cota do nível d'água máximo maximorum	300,000	51,77	2.520,22
Volume útil	-	-	209,63

No Quadro 12.1.1/35 é apresentada a curva cota-área-volume do reservatório.

QUADRO 12.1.1/35 - CURVA COTA-ÁREA-VOLUME DO RESERVATÓRIO DE TIJUCO ALTO

COTA (m)	ÁREA (km ²)	VOLUME (m ³ *10 ⁶)	COTA (m)	ÁREA (km ²)	VOLUME (m ³ *10 ⁶)
165.000	0.00	0.00	235.000	16.33	77.96
170.000	0.40	0.67	240.000	17.99	85.77
175.000	1.09	3.58	245.000	19.79	94.42
180.000	2.09	7.80	250.000	21.71	103.71
185.000	3.15	13.00	255.000	23.80	113.72
190.000	4.33	18.62	260.000	25.96	124.35
195.000	5.54	24.61	265.000	28.24	135.45
200.000	6.86	30.95	270.000	30.66	147.19
205.000	8.12	37.42	275.000	33.71	160.85
210.000	9.44	43.88	280.000	36.93	176.53
215.000	10.71	50.35	285.000	40.10	192.53
220.000	11.97	56.68	290.000	43.78	209.63
225.000	13.40	63.40	295.000	47.56	228.27
230.000	14.87	70.64	300.000	51.77	248.25

Nos estudos considerou-se o reservatório operando na cota referente ao seu nível d'água máximo normal estabelecido na cota 290 m e no ponto mais profundo do reservatório, junto ao local do eixo, foi fixado na cota 180,000 m. Esta condição resulta em uma espessura de lâmina d'água de 110 metros.

Para a modelagem do perfil vertical da temperatura da água, considerou-se uma grade de pontos distribuída a cada dois metros de profundidade, o que resulta em 55 pontos para efeito de obtenção de resultados da modelagem matemática.

A tomada d'água da usina foi considerada na elevação 272 m, visando a captação das águas de melhor qualidade veiculada na camada mais próxima da superfície do reservatório.

- Dados Climáticos

Os dados de natureza climática, necessários à composição dos dados de entrada da modelagem, expressas em termos médios mensais, foram obtidos da estação meteorológica de Cerro Azul, operada pelo Instituto Agrônômico do Paraná – IAPAR, localizada nas coordenadas de 24º 49' de Latitude Sul e 49º 15' de Longitude Oeste e altitude de 443 m.

As informações compreendem os seguintes parâmetros climáticos: temperatura do ar; insolação; umidade relativa do ar; velocidade do vento; radiação solar e nebulosidade. Dentre estes parâmetros, a radiação solar constitui o parâmetro mais importante em termos de fonte de calor.

No Quadro 12.1.1/36 são apresentados os valores dos parâmetros climáticos expressas em termos médios mensais de longo período.

QUADRO 12.1.1/36 - REGISTROS MÉDIOS MENSAIS DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS

MÊS	TEMPERATURA DO AR (°C)	INSOLAÇÃO (kcal/m ² /dia)	UMIDADE REL. DO AR (%)	VELOCIDADE DO VENTO (m/s)
Janeiro	24,4	4650	78,6	1,01
Fevereiro	24,4	4696	79,4	1,05
Março	23,3	4414	81,5	0,99
Abril	20,9	4329	82,2	0,92
Maio	17,6	3623	85,0	0,91
Junho	15,4	3113	86,3	0,84
Julho	15,2	3631	84,1	0,88
Agosto	16,5	3695	81,1	0,98
Setembro	18,2	3552	79,2	1,14
Outubro	20,6	4167	76,9	1,18
Novembro	22,6	4859	74,4	1,21
Dezembro	23,9	4758	75,9	1,15

- Dados Fluviométricos

No Quadro 12.1.1/37 são apresentadas as vazões médias mensais e a temperatura da água no local da UHE de Tijuco Alto. As vazões foram compiladas com base na série gerada para o local do eixo, compreendido de janeiro de 1931 a dezembro de 2003, e as temperaturas da água foram obtidas das séries de levantamentos de qualidade da água realizadas em diversos pontos a montante do eixo de Tijuco Alto.

QUADRO 12.1.1/37 - VAZÕES MÉDIAS MENSAIS E TEMPERATURA DA ÁGUA

MÊS	VAZÃO (m ³ /s)	VOLUME (m ³ /dia)	TEMP. DA ÁGUA (°C)
Janeiro	126,7	10.919.129	23,00
Fevereiro	128,1	11.017.773	22,90
Março	110,0	9.522.937	22,80
Abril	88,1	7.603.174	24,25
Maio	93,0	8.149.510	19,00
Junho	96,6	8.430.266	14,00
Julho	94,3	8.172.274	17,85
Agosto	83,5	7.238.950	20,00
Setembro	98,4	8.422.678	21,50
Outubro	105,6	8.991.777	18,90
Novembro	93,6	8.066.042	21,50
Dezembro	97,6	8.286.094	24,10

- Resultados da Simulação

A simulação considerou o reservatório operando sem deplecionamento, mantendo-se a elevação do nível d'água na cota 290 m. Nestas condições as vazões afluentes e defluentes foram consideradas de mesma magnitude.

Na Figura 12.1.1/09 são apresentados os resultados da simulação, indicando-se mês a mês o comportamento sazonal do perfil de temperaturas da água, considerando-se já estabilizadas as condições de escoamento e de estratificação térmica.

Os resultados apontam a termoclina estabilizada próxima à cota 260 m, o que equivale a uma espessura de lâmina d'água de aproximadamente 30 m correspondente à camada do epilímnio.

No arranjo das estruturas hidráulicas, a tomada d'água de derivação para a casa das máquinas foi posicionada na cota 272 m. O canal de acesso é constituído de uma seção em arco retângulo com 9,0 m de base e 9,0 m de altura, o que permite a captação das águas superficiais de boa qualidade.

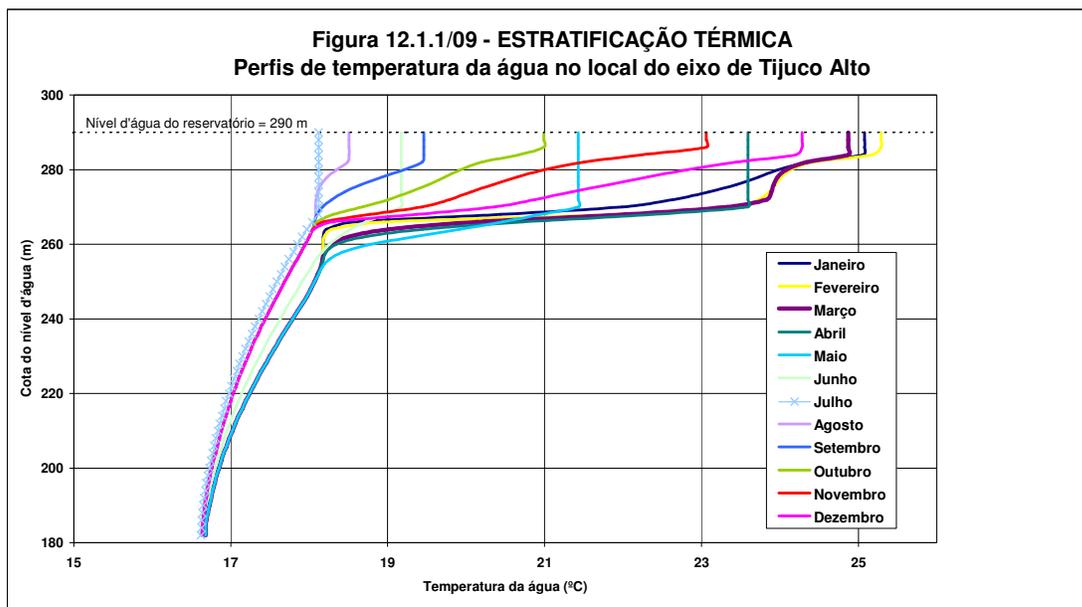
Mesmas condições de qualidade são esperadas para as águas veiculadas pelos vertedores que têm sua crista estabelecida na cota 286 m, portanto apenas 4,0 m abaixo da cota referente ao nível d'água máximo normal.

O reservatório deverá operar com alocação de volume, o que permite um deplecionamento do nível d'água de 5 metros.

Simulações hidrenergéticas realizadas com base no período histórico de vazões de janeiro de 1931 a dezembro de 1996, apontam que o nível d'água do reservatório deverá permanecer na cota 290 m em 64% do tempo, tendo em vista a baixa sazonalidade verificada no regime de vazões. No Quadro 12.1.1/38 são apresentados os valores percentuais de permanência de níveis correspondentes aos demais cotas de níveis d'água apurados nestes processamentos.

QUADRO 12.1.1/38 - PERMANÊNCIA DE NÍVEIS D'ÁGUA

COTA DO NÍVEL D'ÁGUA DO RESERVATÓRIO (m)	PERMANÊNCIA NO TEMPO MAIOR OU IGUAL (%)
285,0	100
286,0	98
287,0	97
288,0	91
289,0	76
290,0	64



- Avaliação dos Impactos na Qualidade da Água

A fase de enchimento constitui o período mais crítico em termos de qualidade da água do reservatório, tendo em vista o processo de incorporação e biodegradação da biomassa inundada e posteriormente a liberação de nutrientes e de compostos orgânicos acarretando impactos significativos ao meio biótico.

A fim de minimizar estes impactos é prevista a implementação de ações de desmatamento e limpeza do reservatório, visando a garantia das condições de sobrevivência da ictiofauna e a preservação da vazão sanitária em condições de qualidade de uso e suprimento aos usuários situados a jusante.

Para a composição dos cenários alternativos a serem simulados, três condições foram objeto de análise:

- ✓ Estabelecimento do mês mais adequado para se iniciar o enchimento do reservatório;
- ✓ Tempo necessário para efetivar a fase de enchimento; e
- ✓ Definição das taxas de desmatamento e limpeza de cada parcela de segmento de forma a garantir a qualidade da água em níveis aceitáveis de qualidade.

- Data de Início e Tempo de Enchimento

Para a fixação da data de início de enchimento do reservatório foram considerados os fatores condicionantes à qualidade da água, ao regime de vazões e ao clima atuante na região.

Quanto ao regime de vazões, os cursos d'água da região caracterizam-se por apresentar um padrão sazonal pouco acentuado, não sendo observado, ao longo do ano, um período

nitidamente seco. As vazões máximas ocorrem geralmente no período de outubro a março e as mínimas de abril a setembro.

Fundamentado nestas características é apresentado no Quadro 12.1.1/39 um leque de opções de enchimento, definindo-se, para cada mês, o tempo necessário para completar esta fase. Nas avaliações foram consideradas as vazões médias mensais de longo período afluente ao local do eixo de Tijuco Alto e a manutenção para jusante da vazão sanitária de 15,5 m³/s, correspondente a 50% da vazão mínima Q_{7,10}. No mesmo Quadro são apresentados também os valores médios mensais de precipitação incidentes na área do reservatório, obtidas com base em dados históricos monitorados na estação pluviométrica de Cerro Azul.

QUADRO 12.1.1/39 – TEMPO DE ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO

MÊS	VAZÃO AFLUENTE (m ³ /s)	VAZÃO DEFLUENTE (m ³ /s)	TEMPO DE ENCHIMENTO (dias)	PRECIPITAÇÃO (mm)
Janeiro	126,7	15,5	274	174,2
Fevereiro	128,1	15,5	283	155,7
Março	110,0	15,5	294	111,5
Abril	88,1	15,5	293	68,5
Maio	93,0	15,5	282	83,3
Junho	96,6	15,5	272	82,3
Julho	94,3	15,5	268	65,2
Agosto	83,5	15,5	269	55,2
Setembro	98,4	15,5	265	108,2
Outubro	105,6	15,5	266	120,0
Novembro	93,6	15,5	270	98,7
Dezembro	97,9	15,5	274	136,9

Com respeito à data de início de enchimento, verifica-se a ocorrência de uma estreita faixa de duração para completar esta fase, com valores compreendidos entre 265 e 294 dias.

Outro aspecto a ser considerado neste processo é a variação sazonal dos valores do pH da água que variam em função da incidência das precipitações e conseqüentemente do regime de vazões do rio. É importante ressaltar que valores de pH ácidos favorecem a solubilização dos metais pesados presentes nos sedimentos de fundo do rio, que são observados em maiores concentrações no curso do rio do Rocha.

Portanto, constitui ponto de extrema importância a definição do início do enchimento do reservatório onde o pH da água tende para maior índice de alcalinidade.

De acordo com as campanhas de qualidade da água, verifica-se que, quando do período de maior vazão, os valores de pH situam-se numa faixa compreendida entre a neutralidade e ligeira alcalinidade. Por outro lado, durante os períodos de estiagem são verificados valores de pH da água sistematicamente maiores, apontando claramente na direção de maior alcalinidade.

Verifica-se, portanto, a existência de uma *relação inversa* entre *vazões e valores de pH*, fato que tem direta implicação na solubilidade de metais e no esquema a ser adotado no enchimento do futuro reservatório. Pode-se afirmar, como uma das principais peculiaridades da bacia em estudo que, em períodos de maior precipitação pluviométrica, os valores de pH tendem à acidez e, contrariamente, que os valores tendem a alcalinidade, nos períodos de menor precipitação pluviométrica. Pode-se entender que a recarga natural, propiciada pelas águas subterrâneas às drenagens de superfície durante o período de estiagem, seja enriquecida em íons bicarbonato, fato que contribui a um aumento dos valores de pH;

contrariamente, o pH tende a valores menores quando dos períodos de pluviosidade, seja pelo efeito diluidor ao aporte proveniente do lençol freático, seja pelo pH de equilíbrio natural das águas de chuva, situado no intervalo entre 5,5 e 6,0.

Considerando-se estes fatos, evidencia-se que o início de enchimento deverá se processar no período de estiagem, o que garantirá a permanência de um teor de alcalinidade maior das águas acumuladas no reservatório.

De acordo com o comportamento sazonal das precipitações e das vazões apresentadas no Quadro 12.1.1/39, verifica-se que o mês de abril, considerado início do período seco, como o mais propício para se iniciar o enchimento do reservatório.

- Definição das Taxas de Desmatamento e Limpeza do Reservatório

As simulações consideraram dois cenários alternativos de enchimento:

- ✓ **Cenário 01** - Não considera a implementação de ações preventivas de desmatamento e limpeza do reservatório e
- ✓ **Cenário 02** – Considera as ações de desmatamento e limpeza do reservatório.

- Análise do Cenário 01

Neste cenário é analisado o comportamento da qualidade da água, considerando-se a inundação da biomassa natural residente na área do lago formado e cujos resultados são utilizados como referência para os demais cenários.

As simulações consideraram como marco de início de fechamento do reservatório, o mês de abril e um período de simulação de dois anos, o que abrange os períodos de enchimento e pós-enchimento do reservatório.

No período de enchimento, estimado em 293 dias, manteve-se constante a liberação da vazão sanitária de 15,5 m³/s até o reservatório atingir a cota correspondente ao nível d'água máximo normal de 290 m. Durante a fase operativa, este nível d'água foi mantido constante, ou seja, foi descarregada para jusante a vazão afluenta ao eixo de Tijuco Alto.

Nas Figuras 12.1.1/10 a 12.1.1/23 são apresentados os resultados do processo de modelagem matemática onde, através de saídas gráficas, são analisados os comportamentos temporal e espacial dos parâmetros de qualidade da água.

Para cada parâmetro analisado: OD, DBO, NO, PO, NO₃, NH₃ e OPO₄, os resultados foram apresentados através de dois conjuntos de gráficos: um considerando os segmentos do corpo central do reservatório e outro reunindo os segmentos representativos dos tributários afluentes.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o oxigênio dissolvido constitui o parâmetro mais afetado ao longo dos primeiros 300 dias a partir do início do enchimento. Concentrações mais baixas de oxigênio dissolvido são verificadas ao longo dos trechos remansados dos braços afluentes.

No corpo central do reservatório, onde ocorre o fluxo preferencial do escoamento, os níveis de oxigênio dissolvidos apresentam-se relativamente mais elevados e com concentrações decrescentes à medida que se desloca para jusante. Em todos os segmentos deste percurso, as concentrações de oxigênio dissolvido resultaram sempre maiores ou iguais a 4 mg/l.

Nos compartimentos segmentados dos braços tributários, principalmente naqueles onde os tempos de residência são mais elevados e o escoamento se processa de forma mais lenta, são observados piores índices de qualidade das águas. Mesmo assim, apenas em quatro segmentos: 03, 07, 09 e 11, foram registradas concentrações de oxigênio dissolvido inferiores a 4 mg/l.

No segmento 14 do corpo central (rio Ribeira – montante), os índices de oxigênio dissolvido, na situação mais crítica atingem valores mínimos da ordem de 7,6 mg/l.

Para os demais segmentos do corpo central do reservatório, até o eixo, estes valores são decrescentes para jusante, registrando-se piores índices no segmento 01, junto ao eixo de Tijuco Alto, onde são registrados concentrações de oxigênio dissolvido de 4,0 mg/l.

Apesar da ocorrência de baixas taxas de oxigênio dissolvido, observa-se uma rápida recuperação deste parâmetro. No curso do rio Ribeira, o segmento 01 mais afetado em termos de qualidade da água, a recuperação deste parâmetro para enquadramento em rios Classe 2 (5 mg/l) é de 152 dias.

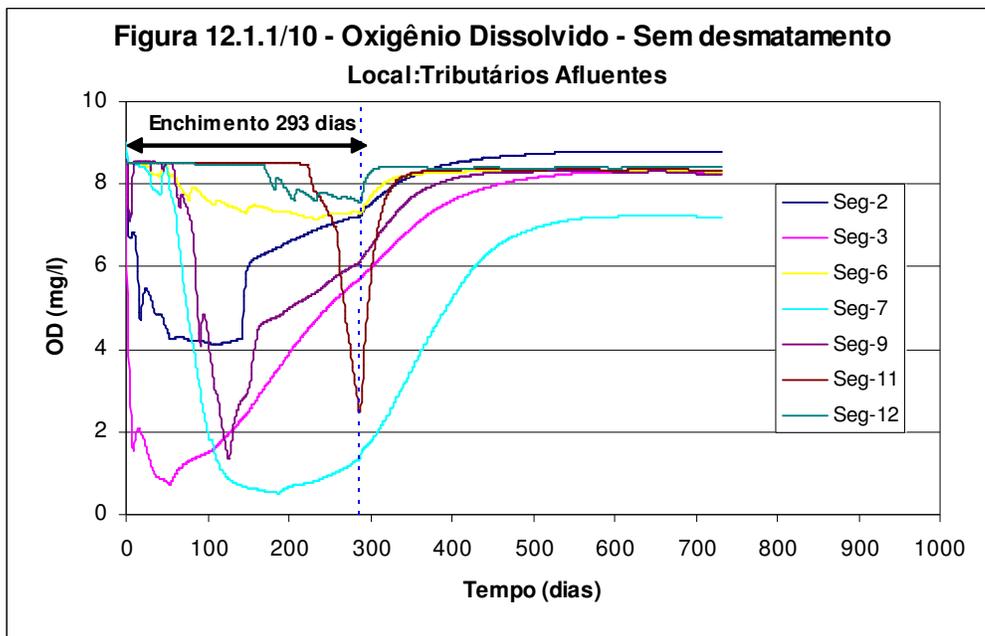


Figura 12.1.1./11 - Oxigênio Dissolvido - Sem desmatamento
Local: Corpo Central do Reservatório

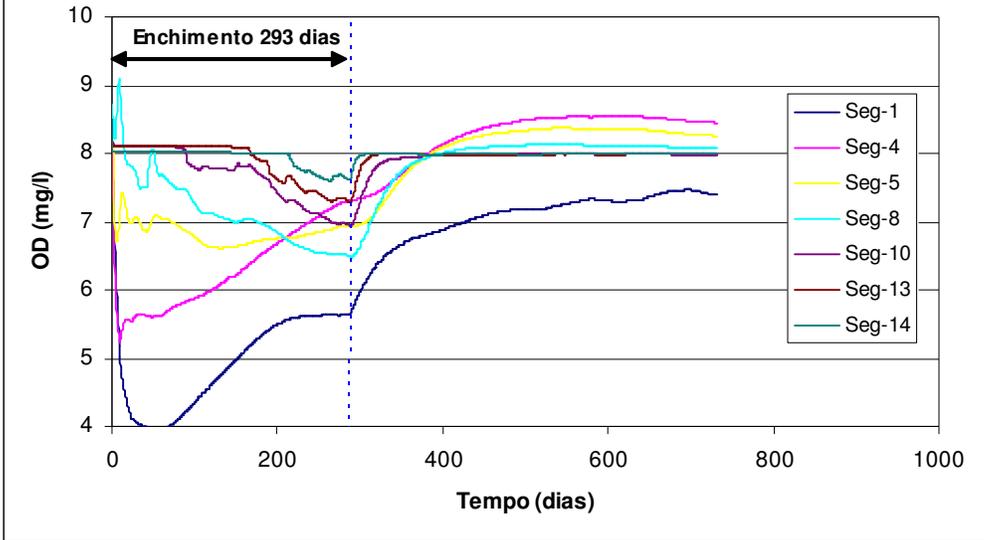
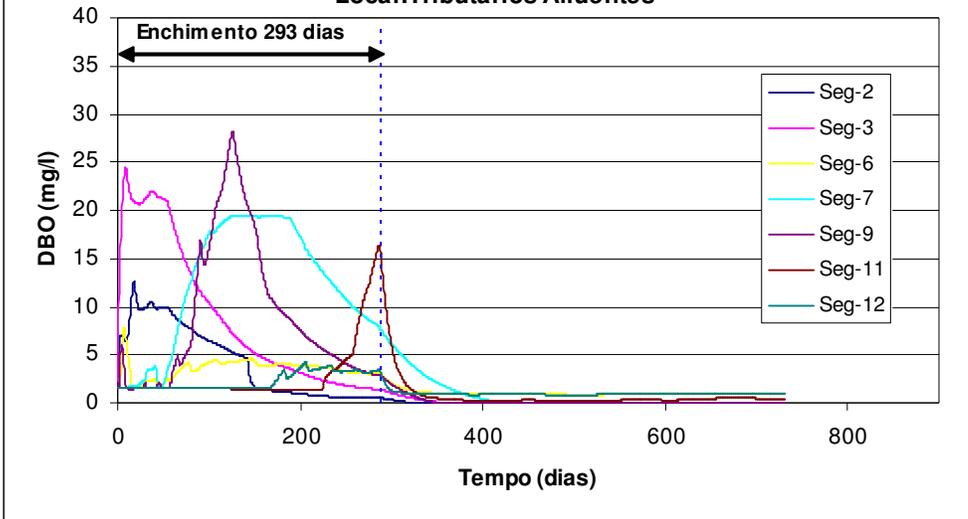
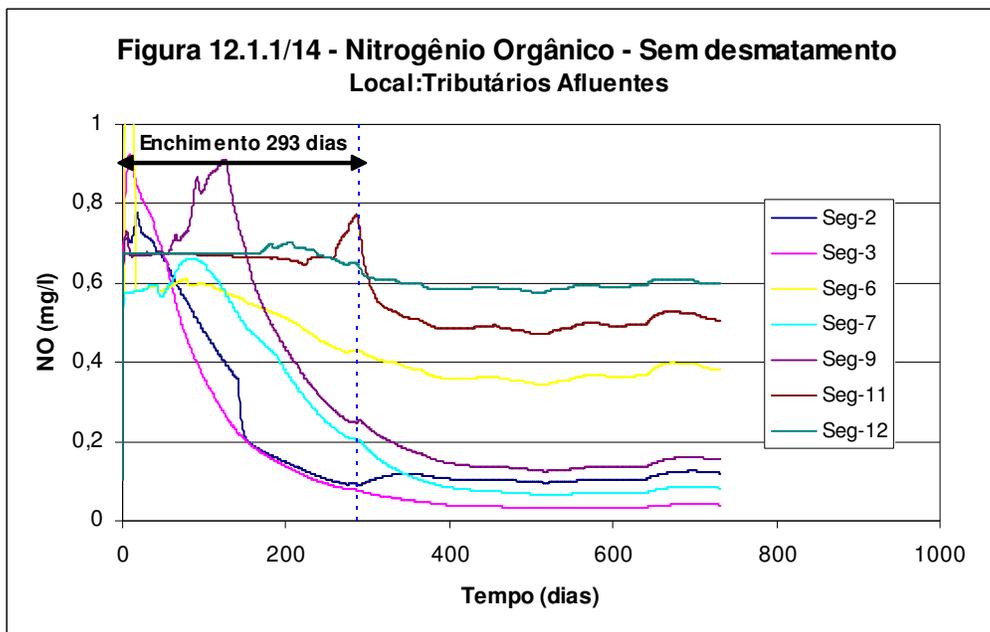
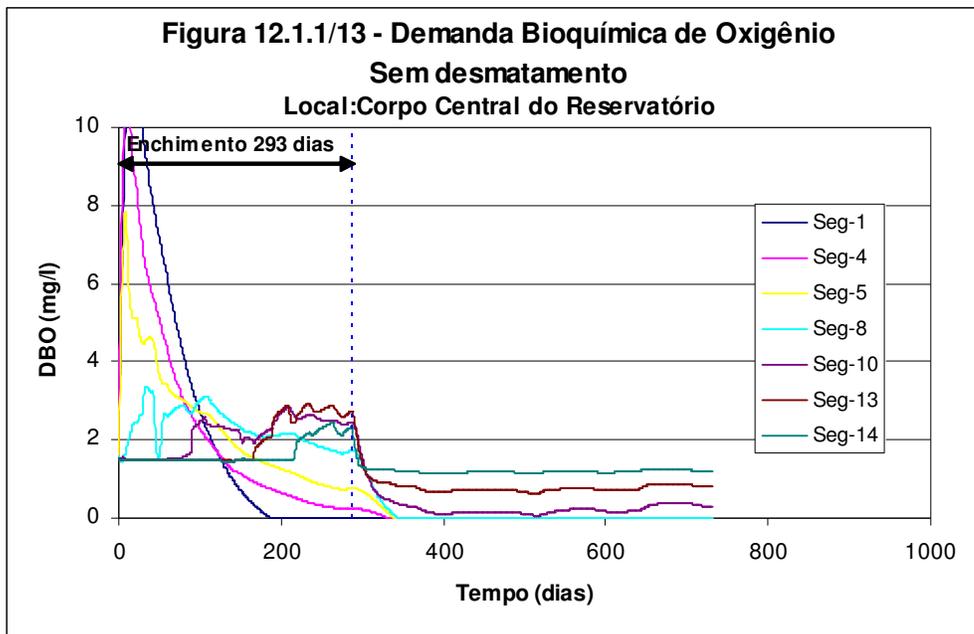
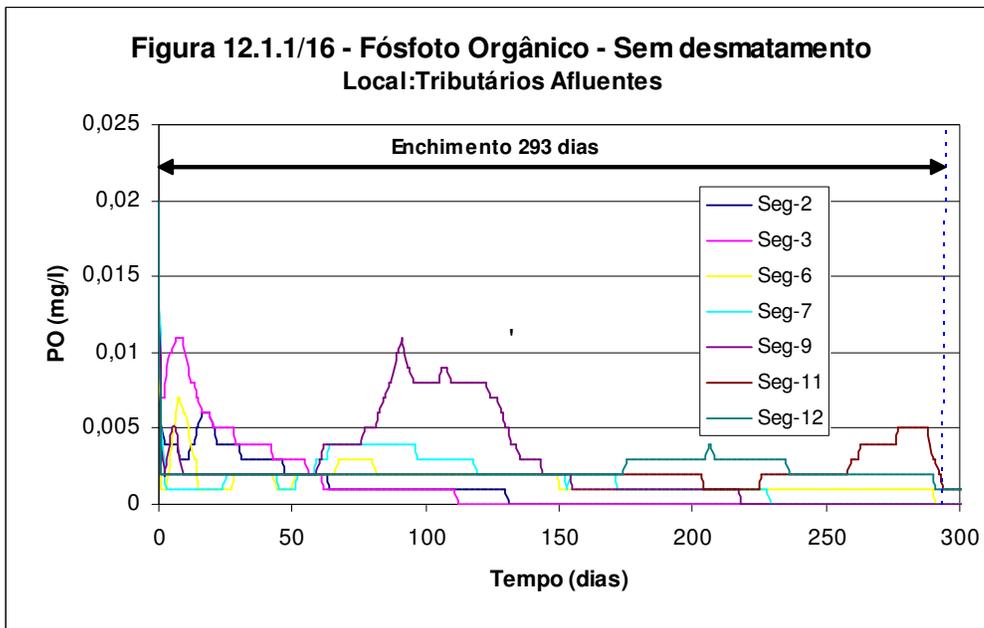
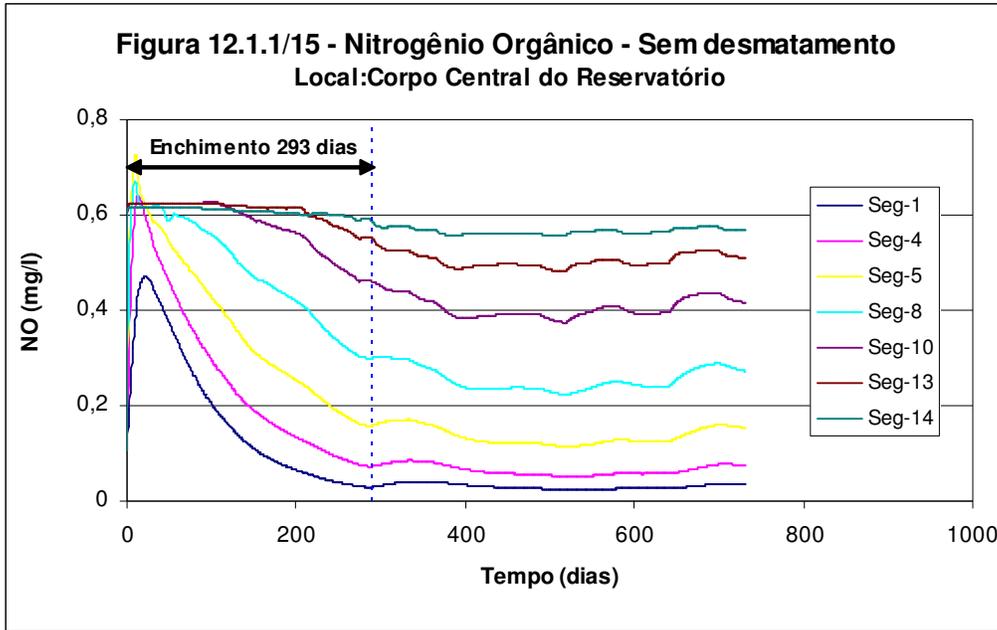
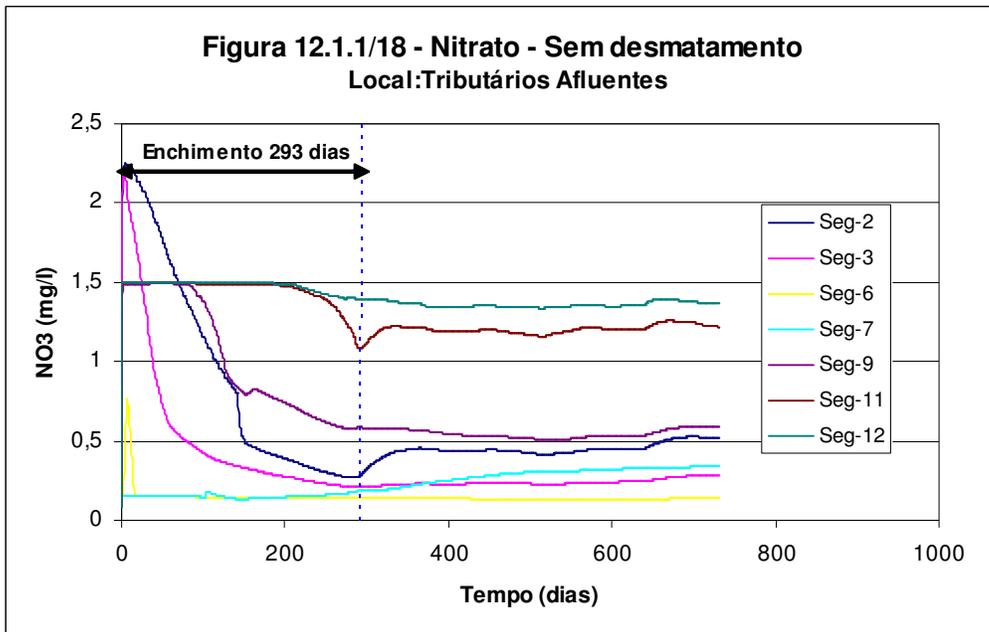
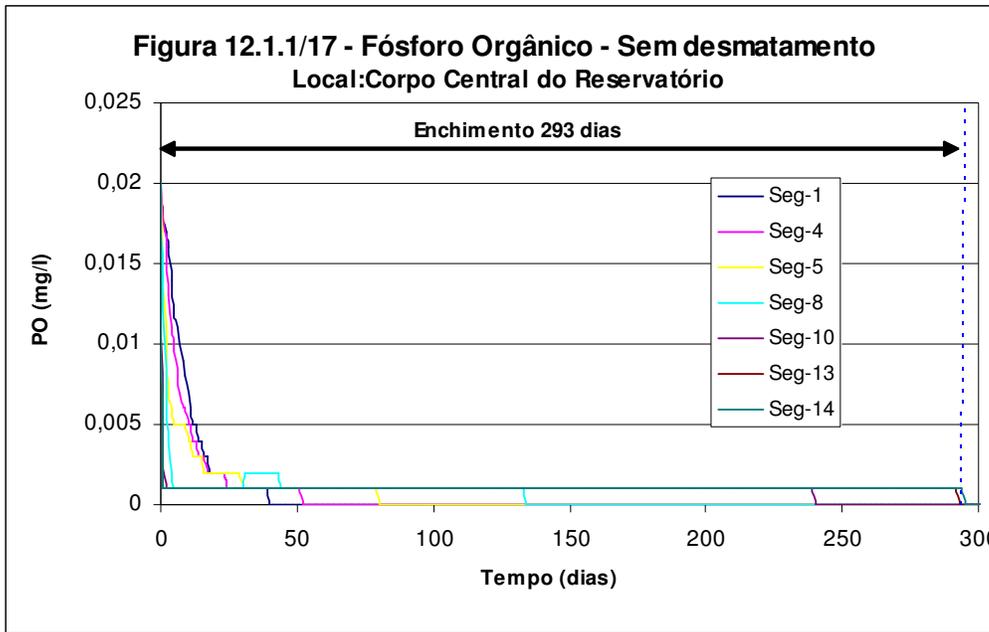


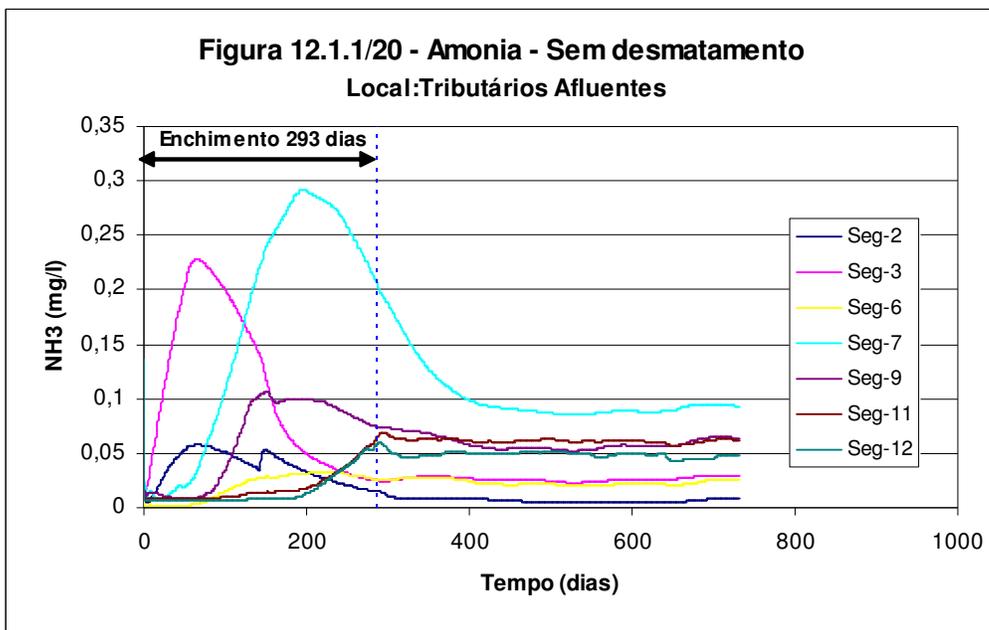
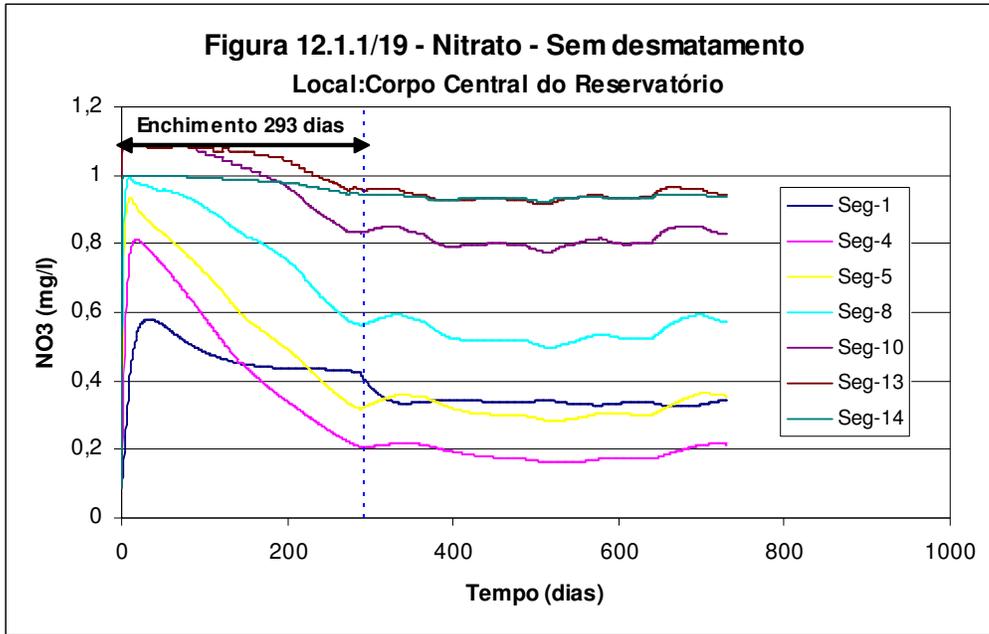
Figura 12.1.1/12 - Demanda Bioquímica de Oxigênio
Sem desmatamento
Local: Tributários Afluentes

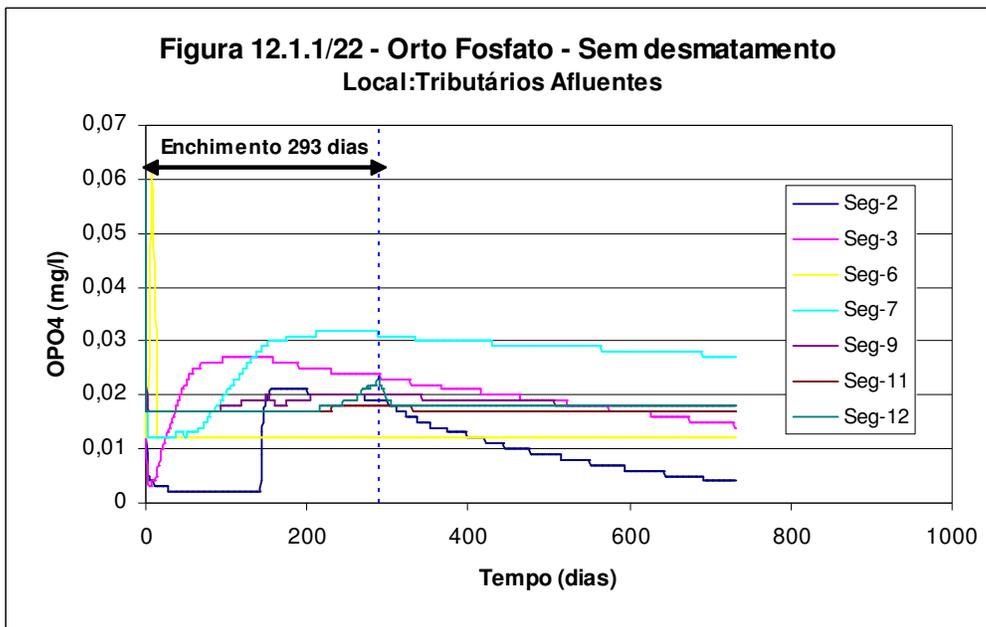
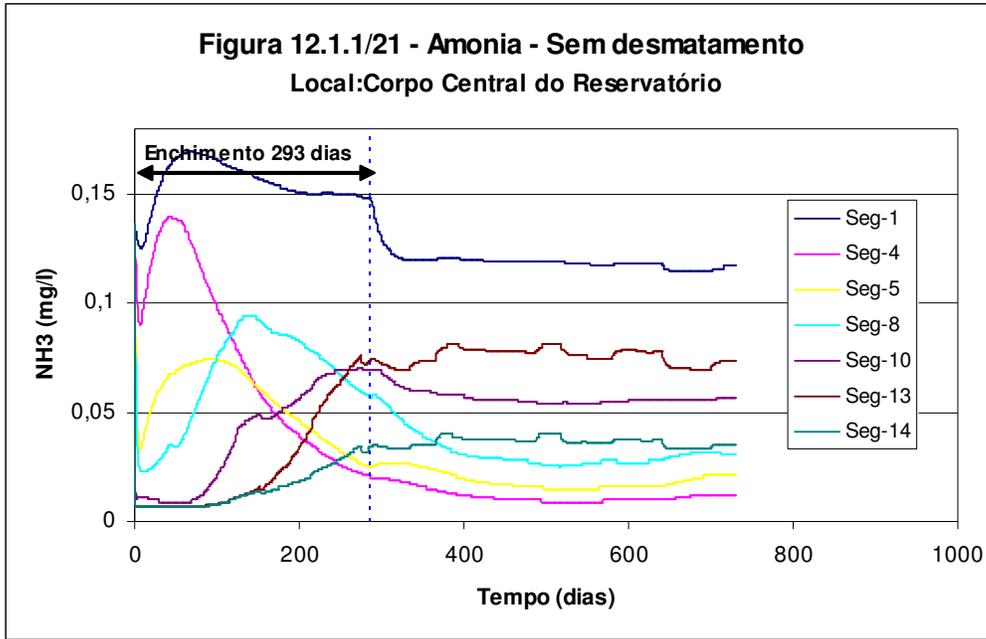


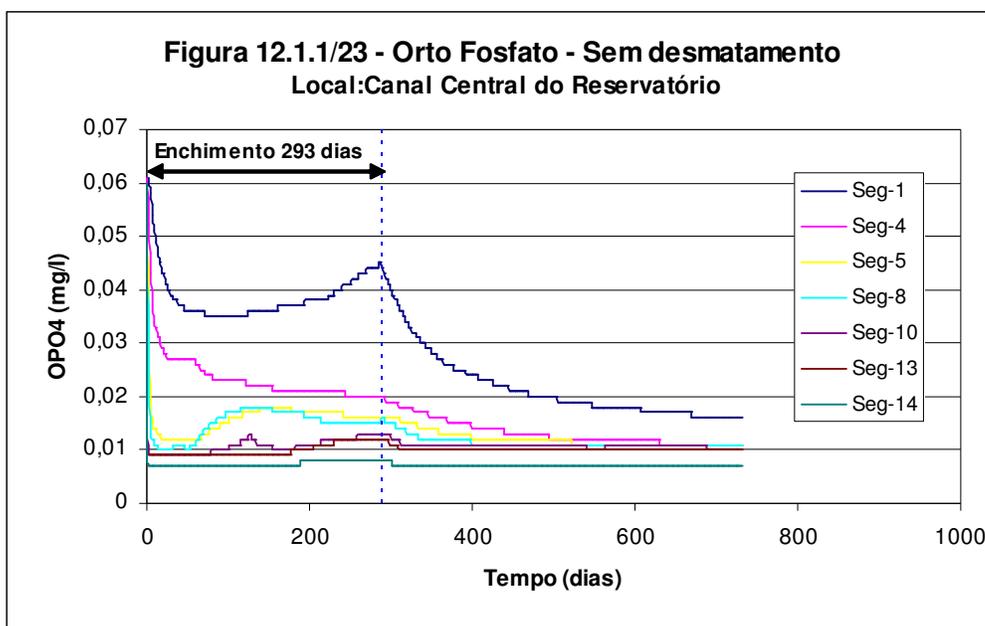












- Análise do Cenário 02

Neste cenário são apresentados os resultados da simulação, considerando a implementação de ações preventivas de desmatamento e limpeza da área a ser abrangida pelo futuro lago, visando a preservação da qualidade da água durante as fases de enchimento e operação do reservatório.

Para o estabelecimento das taxas de desmatamento foram analisadas as seguintes questões:

- ✓ Aumento dos níveis de concentração de oxigênio dissolvido nas parcelas de segmentos mais afetados do reservatório. Neste aspecto deverão receber atenção especial, os segmentos 03, 07, 09 e 11 que apresentaram concentrações de oxigênio dissolvido inferiores a 4 mg/l no cenário 01.
- ✓ Análise dos segmentos que apresentam valores de tempo de residência mais elevados e, como consequência, menor circulação de água, o que favorece a ocorrência do processo de eutrofização. No Quadro 12.1.1/40 são apresentados os valores dos tempos de residência dos compartimentos dos braços tributários do reservatório, onde estes valores são geralmente maiores. Os tempos de residências apresentados consideram o volume de cada segmento na cota operacional referente ao nível d'água máximo normal de 290 m.

QUADRO 12.1.1/40 - TEMPOS DE RESIDÊNCIA DOS BRAÇOS TRIBUTÁRIOS

Segmento	Local	Volume (m ³ * 10 ⁶)	Vazão Média (m ³ /s)	Tempo de Residência (dias)
02	Rio das Onças	32,47	1,53	245,6
03	Rio. Do Rocha	112,15	1,55	837,4
06	Rio Itapirapuã	18,63	7,64	28,2
07	Rio Sete Quedas	47,79	1,65	335,2
09	Rio Mato Preto	29,29	1,80	188,3
11	Rio Ponta Grossa	2,04	1,42	16,6
Reservatório		2043,70	101,25	233,6

O tempo de residência da água é uma das variáveis importantes que influenciam os processos químicos e biológicos que ocorrem nos reservatórios (Straškraba, 1999). Considera-se que reservatórios com tempos de residência inferiores a duas semanas sejam ecossistemas com comportamentos similares aos de rios (ambientes com elevadas taxas de renovação da água); com TR superiores a duas semanas e menor que um ano, sejam ambientes com posição intermediária entre rio e lago; e com TR superiores a um ano, sejam ecossistemas com características bastante próximas a lacustres (STRAŠKRABA, 1999).

Dependendo da magnitude, o tempo de residência pode induzir condições favoráveis para a ciclagem dos nutrientes e para o desenvolvimento do fitoplâncton e de macrófitas aquáticas. Quanto maiores os tempos de residência, maiores tenderão a ser as alterações na qualidade da água do reservatório em relação às dos rios originais.

No caso do reservatório da UHE Tijuco Alto, o tempo médio de retenção hidráulica será de 234 dias o que o enquadra como ambientes de composição intermediária entre rio e lago. Mesma condição é verificada para os demais braços tributários, à exceção do braço contribuinte do rio Ponta Grossa que apresenta comportamento similar aos de rios.

Baseados nos valores dos tempos de residência, verificam-se que os segmentos 02, 03, 07 e 09 deverão ser contemplados nos planos de desmatamento e limpeza do reservatório, visando minimizar a ocorrência de eutrofização destes braços. Ressaltam-se que, durante o processo de biodegradação da fitomassa inundada, são liberados os nutrientes nitrogênio e fósforo no meio líquido.

- ✓ Remoção radical da fitomassa presente no compartimento do braço tributário do rio do Rocha (segmento 03) e dos segmentos subsequentes a jusante 04 e 01, representativos do corpo central do reservatório, onde os sedimentos do fundo do rio encontram-se contaminados pelos rejeitos provenientes da mineração do chumbo.

Este procedimento visa a redução máxima da matéria orgânica presente nestes segmentos, visando com isto minimizar a produção dos ácidos húmico e fúlvico que poderão promover a redução do pH da água e, como consequência, favorecer a formação indesejável de complexos solúveis contendo o metal pesado chumbo.

Ressalta-se que, durante a fase de estabilização das condições hidráulicas do reservatório, uma nova dinâmica de escoamento deverá ser estabelecida quando da ocorrência da estratificação térmica do reservatório, onde serão formados dois reatores bioquímicos independentes, respectivamente o hipolímnio e o epilímnio.

Na camada do hipolímnio a qualidade da água tenderá a se manter em piores condições, tendo em vista a ocorrência de processos bioquímicos associados, a reduzida ou quase nula renovação e circulação do fluxo d'água, falta de aeração e consumos progressivos de oxigênio dissolvido, o que favorece a ocorrência de condições anóxicas. Neste ambiente prevalece a ocorrência de condições redutoras, onde são normalmente observadas ocorrências de baixas concentrações de oxigênio dissolvido, produção de gás sulfídrico e metano, e de enriquecimento de elementos químicos para a coluna d'água através da solubilização.

Na camada do epilímnio, a água tenderá a se manter de boa qualidade favorecido pelo fluxo preferencial do escoamento que se concentrará neste compartimento superior, além do processo de oxigenação da água promovida pelo seu contato com a atmosfera e precipitação de elementos, tais como o ortofosfato.

De acordo com as considerações apresentadas, são relacionados no Quadro 12.1.1/41 os segmentos que deverão ser objeto de ações preventivas de desmatamento e limpeza.

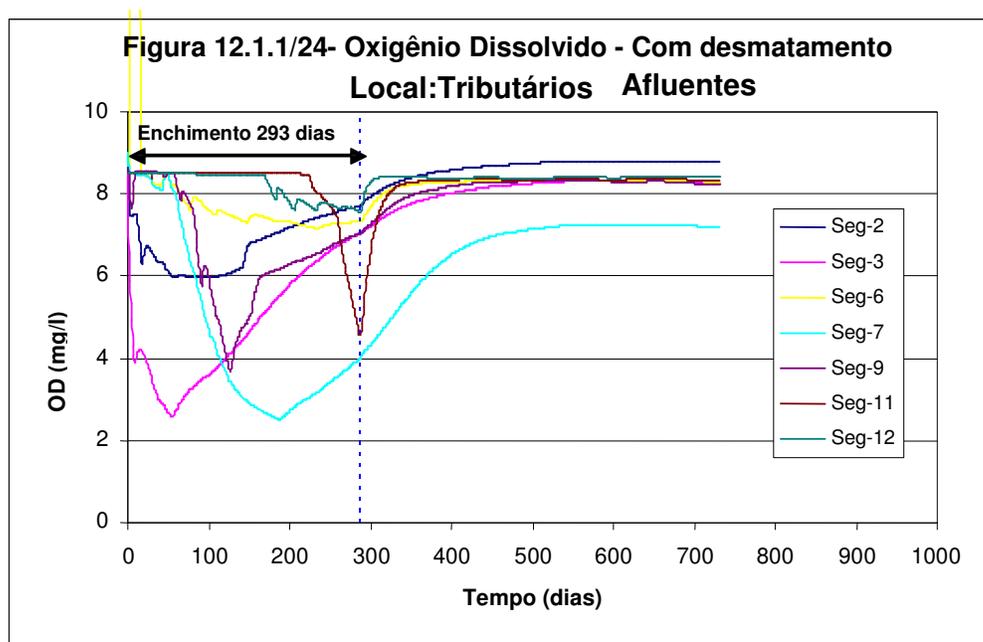
QUADRO 12.1.1/41 - SEGMENTOS CONSIDERADOS NAS AÇÕES DE DESMATAMENTO

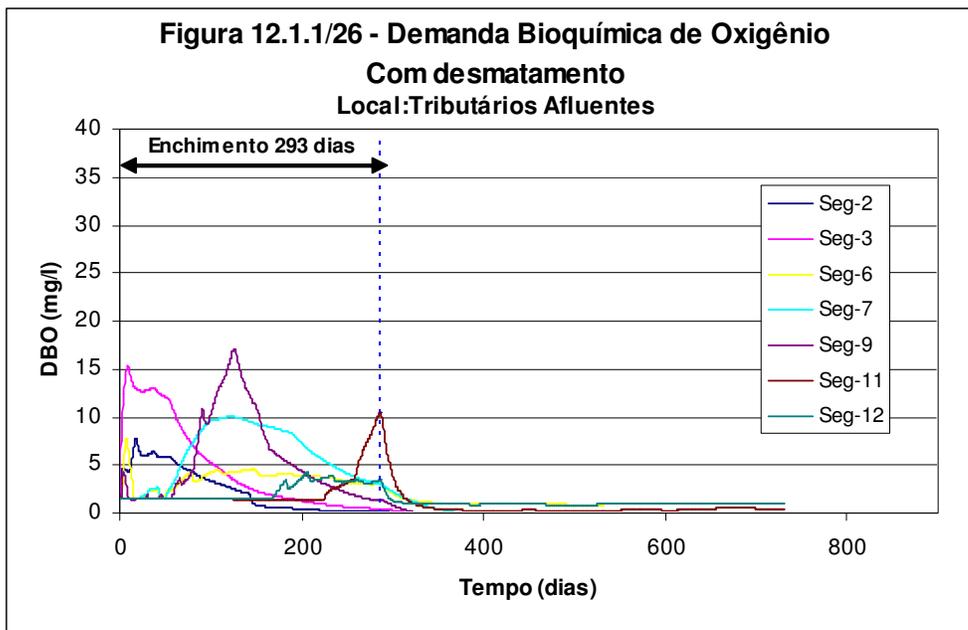
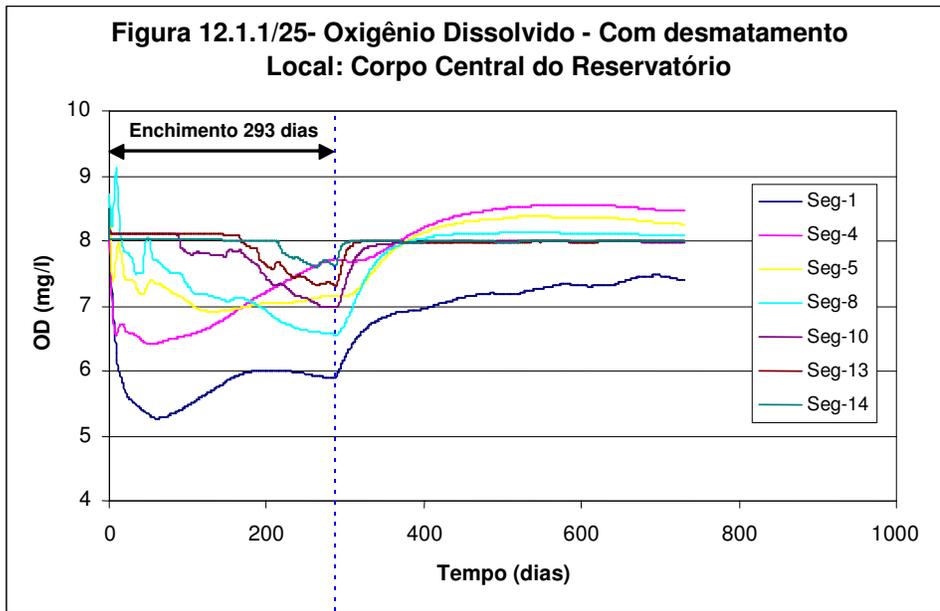
Segmento	Área Total (km ²)	Porcentagem de Desmatamento (%)	Área a ser Desmatada (km ²)	Local
1	6,97	90	6,273	Corpo central
2	0,95	90	0,855	Braço do Rio das Onças
3	2,88	90	2,592	Braço do rio do Rocha
4	7,16	90	6,444	Corpo central
5	7,56	90	6,804	Corpo central
7	1,87	90	1,683	Braço do rio Sete Quedas
9	1,14	90	1,026	Braço do rio Mato Preto
11	0,34	90	0,306	Braço do rio Ponta Grossa
12	0,38	90	0,342	Lateral 12
Total	43,77	60,1	26,325	Reservatório

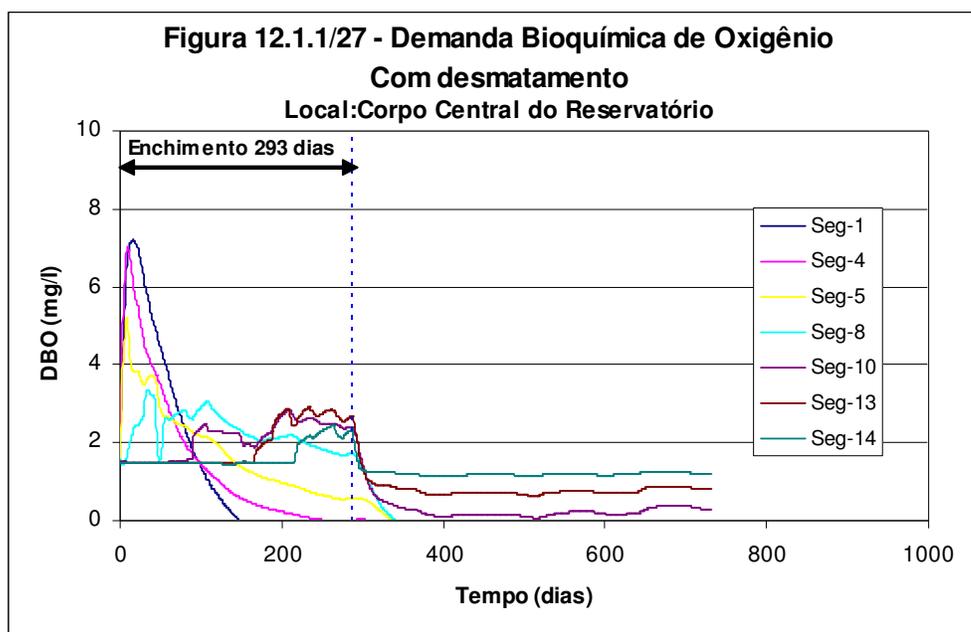
As parcelas de segmentos afetadas por estas ações preventivas deverão ter 90% de sua área desmatada, o que inclui o segmento 05 do corpo central, situado adjacente ao segmento 04. Nestas condições são consideradas para a biodegradação as parcelas da vegetação remanescente estimada em 10% e as parcelas componentes da serapilheira e da matéria carbonácea presentes na camada superficial do solo.

O percentual de vegetação remanescente, estimada em 10%, deverá ser preservada nos locais onde existe o risco de erosões e instabilidade dos taludes.

Nas Figuras 12.1.1/24 e 12.1.1/25 são apresentados de forma gráfica a evolução temporal do oxigênio dissolvido para cada segmento considerado na modelagem e nas Figuras 12.1.1/26 e 12.1.1/27 a evolução temporal da DBO – demanda bioquímica do oxigênio.







De acordo com os resultados da simulação, dois segmentos representativos dos braços tributários se revelam como mais críticos, mesmo com a implementação das ações preventivas de desmatamento e limpeza do reservatório:

- ✓ **Segmento 07** – braço do rio Sete Quedas. Concentrações inferiores a 4 mg/l deverão ser observadas por um período de aproximadamente 175 dias, sendo observado nas condições mais críticas, a ocorrência de taxas de oxigênio dissolvido da ordem de 2,5 mg/l; e,
- ✓ **Segmento 03** – braço do rio do Rocha. Também são observadas concentrações mínimas da ordem de 2,6 mg/l neste compartimento, porém o período com concentrações abaixo de 4 mg/l são observados por um período de 100 dias.

Extrapolando os valores de concentrações mínimas de oxigênio dissolvido estabelecidas para rios classe 2, tem-se ainda os segmentos 09 e 11 que mantém valores de concentrações abaixo de 5 mg/l, durante um período aproximado de 40 e 10 dias respectivamente.

Para os demais segmentos, os valores de concentrações de oxigênio dissolvido se enquadram dentro dos limites estabelecidos para rios classe 2.

Os resultados aqui apresentados caracterizam o comportamento da qualidade da água durante a fase de enchimento do reservatório, que constitui o período mais crítico em termos de impactos causados à qualidade das águas.

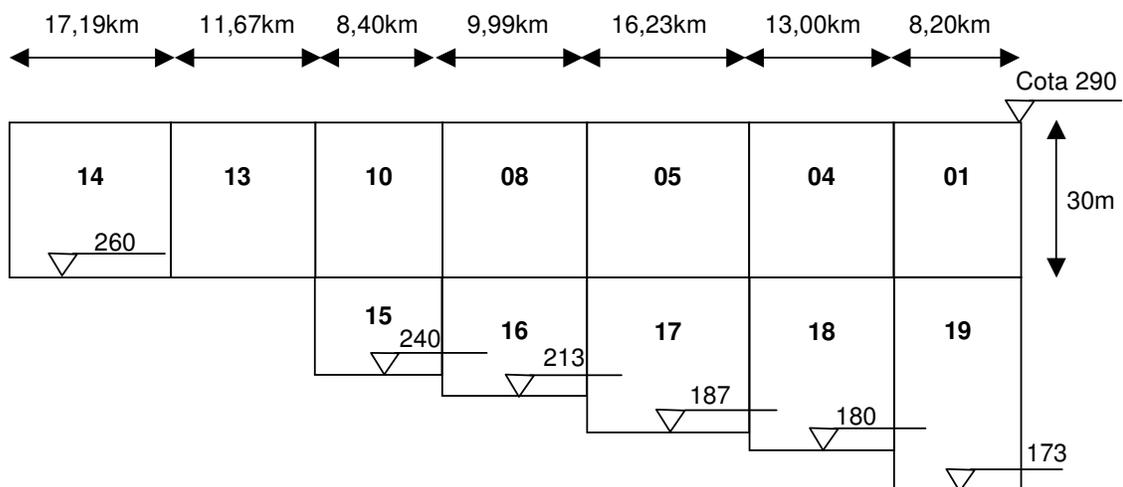
No decorrer da fase operativa, um novo equilíbrio hídrico será estabelecido no reservatório, quando o processo de estratificação térmica irá criar duas camadas distintas, o hipolimnion e o epilimnion, que terão comportamentos distintos e cujas análises são apresentadas no item a seguir.

Modelo de Qualidade da Água de Duas Camadas

No processo de modelagem o reservatório é representado em três dimensões, considerando-se também a formação das camadas do epilímnio e hipolímnio decorrentes do processo de estratificação térmica do reservatório, conforme apresentado no item “Modelo de Estratificação Térmica”.

No esquema de partição, foram adicionados mais cinco segmentos representativos do corpo central do reservatório, correspondente à camada do hipolímnio, de acordo com o esquema de apresentado na Figura 12.1.1/28. No caso dos braços tributários manteve-se a mesma configuração original conforme esquematizada na Figura 12.1.1/08, apresentada anteriormente.

FIGURA 12.1.1/28 - ESQUEMA DE PARTIÇÃO ESTRATIFICADA DO CORPO CENTRAL DO RESERVATÓRIO



No esquema de partição de vazão, considerou-se a partir do segmento 13, que apenas uma parcela de 80% do fluxo afluente penetra na camada do epilímnio (Segmento 10) e 20% é dirigido ao hipolímnio (Segmento 15), privilegiando desta forma um fluxo preferencial de superfície.

No processo de circulação de água no reservatório, considerou-se o retorno do fluxo de vazões à camada superficial é realizada de forma progressiva, a partir do segmento 15 até o segmento 19, com percentuais de transferência de água entre compartimentos (do epilímnio para o hipolímnio) de 10%, 15%, 20%, 25% e 30% respectivamente.

Nesta dinâmica, as análises relativas ao comportamento do oxigênio dissolvido adquire uma posição central. Além da importância para o subsídio à sobrevivência dos peixes e demais organismos aeróbios, a presença deste elemento também condiciona a disponibilidade de nutrientes, interferindo diretamente no processo de eutrofização.

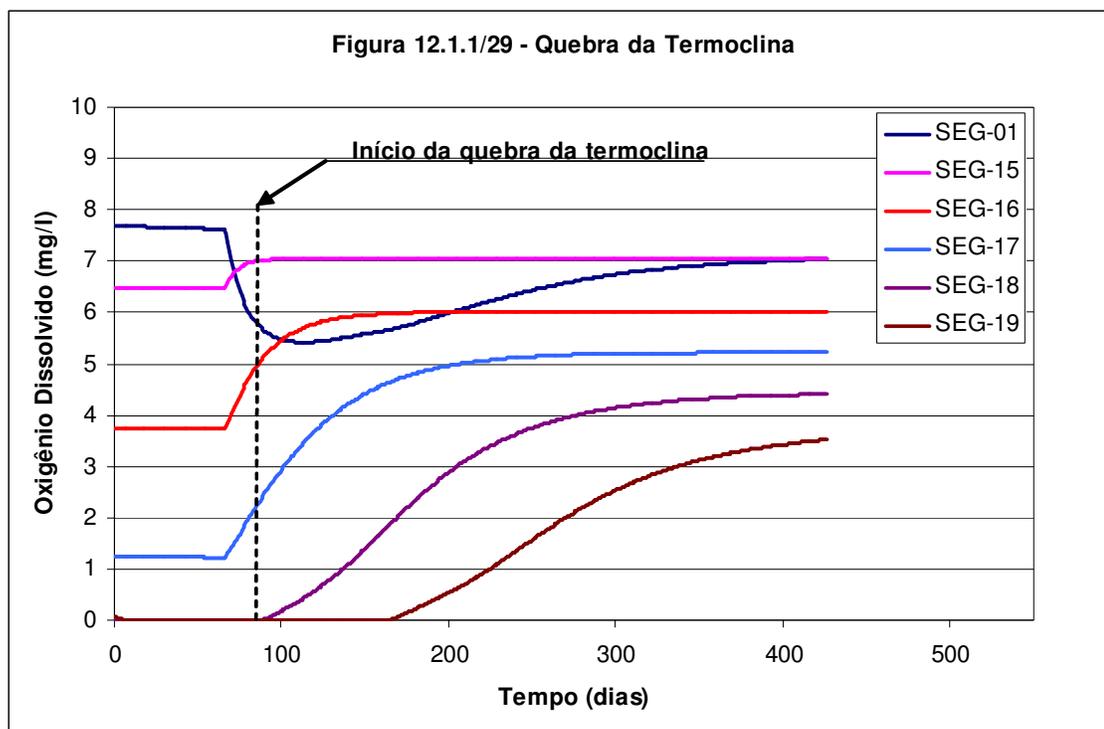
A presença de oxigênio mantém o sistema aquático em condições oxidantes. Nesta condição, normalmente, ocorre a oxidação e/ou hidratação (química ou biológica) de cátions metálicos que se ligam a espécies fosfatadas (por adsorção) e precipitam. Ainda nesta condição (oxidante) as formas fosfatadas podem reagir com argilas (e.g. gipsita, hematita) e, de forma similar, precipitam (WETZEL, 1983).

A manutenção das condições oxidantes conserva os precipitados, ricos em fósforo e outros nutrientes, imobilizados nas camadas superficiais dos sedimentos. Na ocorrência de rebaixamento do potencial de oxi-redução, pelo evento de anaerobiose ou anoxia, estes compostos precipitados solubilizam e difundem para a coluna d'água, contribuindo para a eutrofização do ambiente aquático. Este processo de eutrofização induzido pela ausência de oxigênio é usualmente denominado: "autofertilização" (ESTEVES, 1988). Pelo exposto, fica evidente a importância de minimizar a ocorrência de anaerobiose como mecanismo de controle e atenuação da eutrofização e redução das concentrações solúveis de compostos contendo metais pesados.

As simulações realizadas apontam uma taxa de oxigênio dissolvido variando de 7,6 mg/l a 8,6 mg/l na camada do epilimnio, incluindo também os braços tributários do reservatório.

Na camada do hipolimnio, as concentrações de oxigênio dissolvido apresentaram um padrão gradual decrescente de variação entre os segmentos de números 15 e 19, com valores respectivos de 6,5 mg/l; 3,7 mg/l; 1,2 mg/l e valores próximos de zero mg/l nos Segmentos 18 e 19.

No elenco de cenários simulados, considerou-se também a pouco provável ocorrência da quebra da termoclina, onde ocorre a mistura dos reatores independentes das camadas do epilimnio e do hipolimnio. Nestas condições verifica-se um aumento das taxas de oxigênio dissolvido do hipolimnio, cujo comportamento temporal é retratado na Figura 12.1.1/29.



Na camada do epilimnio, o Segmento 01, mais afetado por esta quebra, deverá ser verificado nas condições mais críticas valores de oxigênio dissolvido da ordem de 5,4 mg/l.

Estes fatos assinalam que na camada do epilimnio irão conviver ambientes com condições de aerobiose e anaerobiose.

No que diz respeito ao comportamento da qualidade da água do reservatório de Tijuco Alto, em ambientes aeróbicos e anaeróbicos, citam-se os experimentos desenvolvidos em laboratório, pelo Departamento de Hidrobiologia da Universidade Federal de São Carlos, que atestaram, entre outros resultados, a evolução do comportamento temporal do pH da água, face aos processos de biodegradação da biomassa inundada.

Para o desenvolvimento destes experimentos, foram coletadas amostras dos substratos vegetais de cascas, folhas, serapilheira e galhos de áreas adjacentes ao rio Ribeira, representativas das espécies presentes na área do reservatório.

Nos ensaios realizados, cada substrato vegetal representado pelas parcelas de serapilheira, cascas, folhas e galhos foi analisado separadamente o que permitiu evidenciar os seguintes resultados:

- ✓ Para as condições aeróbicas, o experimento teve uma duração de 60 dias e o pH da água inicial situava-se em torno de 9,7. Verificou-se um decréscimo durante os primeiros dias, atingindo o valor mínimo de pH igual a 7,0. Posteriormente, os valores de pH aumentaram até o patamar de 8,4, passando a oscilar em torno deste valor até o fim do experimento; e,
- ✓ Para as condições anaeróbicas, o experimento teve uma duração de 56 dias e o pH da água, no início do experimento, foi de aproximadamente 7,8. Os valores de pH oscilaram durante todo o processo apresentando valores compreendidos entre 5,2 e 7,8 atingindo, no fim do experimento, valores de pH da ordem de 7,3.

De acordo com os resultados obtidos nos dois experimentos, verificou-se uma tendência de preservação das condições de pH básico mesmo nas condições mais críticas de anaerobiose, fator que promove a precipitação dos metais pesados, em particular o chumbo, nos sedimento de fundo do rio.

As referencias bibliográficas referentes aos experimentos realizados, são as seguintes:

✓ **Experimento Anaeróbio:**

- Degradação anaeróbia de folhas, galhos, cascas e serapilheira. BITAR, A. L.; ANTONIO, R. M. & BIANCHINI Jr., I. - Acta Limnologica Brasiliensia, 14 (2):

✓ **Experimento Aeróbio:**

- Consumo de oxigênio na mineralização de folhas, galhos, cascas e serapilheira. ANTONIO, R. M.; BITAR, A. L. & BIANCHINI Jr., I. - Acta Limnologica Brasiliensia, 11 (2): 1-16, 1999.
- Estequiometria da decomposição aeróbia de galhos, cascas serapilheira e folhas. CUNHA-SANTINO, M. B. & BIANCHINI Jr., I. – Recursos hidroenergéticos: usos, impactos e planejamento integrado. Série: Ciências da Engenharia Ambiental, vol. 1 (ESPÍNDOLA, E. L. G., MAUAD, F. F., SCHALCH, V., ROCHA, O., FELICIDADE, N. & RIETZLER, A., C. eds.). São Carlos: Rima. p. 43-56, 2002.

– Qualidade da Água a Jusante

A qualidade da água a jusante do reservatório, deverá acompanhar nas primeiras extensões do curso d'água, os índices verificados no segmento 01, localizado adjacente ao eixo de Tijuco Alto.

Em função do arranjo das estruturas hidráulicas, com posicionamentos dos dispositivos

vertentes e da tomada d'água para a casa de força situados na faixa da camada do epilímnio, a qualidade da água para jusante será de boa qualidade.

De acordo com os resultados da simulação, verifica-se que nas condições mais críticas a serem observadas por ocasião do enchimento, as taxas de oxigênio dissolvido no Segmento 01 atinge a concentração mínima de 5,3 mg/l, dentro dos padrões de enquadramento do curso d'água em Classe 2.

Os resultados da modelagem de qualidade da água, apontam para o segmento 01 o seguinte comportamento:

- ✓ Fase de enchimento: A condição mais crítica deverá ser observada em 64 dias a partir do início do enchimento, onde são observadas concentrações de oxigênio dissolvido da ordem de 5,3 mg/l, dentro dos padrões de enquadramento do curso d'água em Classe 2.
- ✓ Fase de operação. A partir da condição mais crítica observada por ocasião da fase de enchimento, observa-se uma recuperação progressiva destes índices, atingindo ao longo do tempo concentrações de oxigênio dissolvido em torno de 7,5 mg/l.

Mesmo com uma eventual quebra da termoclina, as condições de qualidade da água ainda permanecerão em condições satisfatórias, sendo verificada na situação mais crítica, valor mínimo de oxigênio dissolvido no reservatório ordem de 5,4 mg/l. Posteriormente deverá ocorrer uma recuperação progressiva destas taxas, atingindo ao longo do tempo, concentrações da ordem de 7,4 mg/l.

Junto à estrutura vertente da usina, o processo de re-aeração propiciará um incremento nas taxas de oxigênio dissolvido em virtude da turbulência das águas que incidem na bacia de dissipação, onde a água precipita em queda livre de uma altura de aproximadamente 88 m.

À medida que se dirige para jusante, há uma tendência natural de melhoria nos níveis de qualidade da água, propiciados pela presença de trechos de corredeiras, o que favorece também o processo de oxigenação natural das águas.

- Proposição de Ações

Visando minimizar a ocorrência de impactos na qualidade da água, são apresentadas, a seguir, as proposições obtidas com base nos resultados da modelagem matemática e as recomendações, visando o aprimoramento destes estudos, tendo em vista orientar o programa de enchimento do reservatório.

De acordo com os resultados da modelagem matemática o plano de enchimento do reservatório prevê a implementação das seguintes ações:

- ✓ Início do enchimento: estação seca.
- ✓ Período de tempo previsto para se efetuar o enchimento até a cota 290 m: 293 dias.
- ✓ Ações preventivas de desmatamento e limpeza do reservatório, de acordo com o esquema apresentado no Quadro 12.1.1/41.

As análises foram conduzidas através do emprego de técnicas avançadas de modelagem matemática. Apesar disto, dada a extensão e a complexidade do problema, os resultados limitam-se a uma antevisão aproximada dos problemas de qualidade da água que poderão ocorrer com o enchimento do reservatório de Tijuco Alto.

A fim de aprimorar os resultados alcançados no presente estudo, recomenda-se a

realização dos levantamentos:

- ✓ Identificação espacial dos trechos de cursos d'água, cujos sedimentos de fundo encontram-se contaminados pelos rejeitos oriundos da mineração da galena. Dentro deste escopo inclui-se o curso do rio do Rocha, no trecho de rio compreendido entre a Mina do Rocha e sua foz.
- ✓ Deverão ser coletadas amostras de sedimentos de fundo do rio com espaçamento pré determinado, conforme determinar o Projeto Básico Ambiental. Algumas amostragens de sedimentos deverão ser realizadas também a montante da mina do Rocha e no rio Ribeira em pontos situados a montante da confluência com o rio do Rocha a fim de permitir a aferição e consolidação dos limites da contaminação dos cursos d'água e de estabelecer os padrões naturais de concentrações de metais pesados presentes no sedimento de fundo.
- ✓ Realização de novas campanhas de coleta de amostras de qualidade da água, que deverão ser realizadas em épocas distintas ao longo do ano, de forma a permitir uma correlação com o regime sazonal de vazões do rio Ribeira.
- ✓ Aprimoramento dos estudos de modelagem matemática da qualidade da água, tendo em vista a inserção de novas informações obtidas.

Durante as fases de enchimento e operação do reservatório, estão previstas a implementação de campanhas de amostragem de qualidade da água ao longo do corpo central do reservatório e dos braços tributários afluentes. As ações propostas estão consignadas nos Programas Ambientais e serão detalhadas na fase de PBA.

Nestas amostragens deverão ser monitoradas, de forma mais intensiva, as concentrações do oxigênio dissolvido, os valores do pH e a temperatura da água em diversas profundidades, principalmente em pontos mais próximos ao local do eixo de Tijuco Alto. As informações disponibilizadas, respaldadas através do emprego de técnicas de modelagem matemática, permitirão acompanhar o processo de estratificação térmica do reservatório bem como possibilitar um conhecimento mais detalhado das transformações e processos que ocorrem nas camadas mais profundas do reservatório, em particular quando os processos bioquímicos ocorrem com a participação de metais pesados.