



**ESTUDOS DE MODELAGEM MATEMÁTICA DA  
QUALIDADE DA ÁGUA DOS RESERVATÓRIOS DO  
XINGU E INTERMEDIÁRIO DA UHE BELO MONTE  
PARA OS PERÍODOS DE BAIXAS VAZÕES  
AFLUENTES AO RIO XINGU**



CURITIBA/PR, FEVEREIRO DE 2019.

# ESTUDOS DE MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DA ÁGUA DOS RESERVATÓRIOS DO XINGU E INTERMEDIÁRIO DA UHE BELO MONTE PARA OS PERÍODOS DE BAIXAS VAZÕES AFLUENTES AO RIO XINGU

**CONTRATANTE:**



**ELABORAÇÃO:**



## **COORDENAÇÃO E RESPONSABILIDADE TÉCNICA**

Helder Rafael Nocko, MSc.

Eng. Ambiental – CREA PR-86285/D

### **EQUIPE TÉCNICA**

André Luciano Malheiros, Dr.

Eng. Civil – CREA PR-67038/D

Diana Maria Cancelli, Dra.

Eng. Ambiental – CREA PR-90223/D

Paulo Henrique Costa

Geógrafo

### **CONSULTORIA TÉCNICA**

José Eduardo Gonçalves

Físico

Tobias Bleninger, Dr.-Ing.

Eng. Civil (KIT, Alemanha)

**DIVULGAÇÃO RESTRITA**

## APRESENTAÇÃO

Apresentamos à Norte Energia S.A. o relatório referente aos **Estudos de Modelagem Matemática da Qualidade da Água dos Reservatórios do Xingu e Intermediário da UHE Belo Monte para os Períodos de Baixas Vazões Afluentes ao Rio Xingu**. Este estudo refere-se ao contrato de prestação de serviços celebrado entre as empresas Norte Energia S.A. e a EnvEx Engenharia e Consultoria S/S Ltda. – EPP sob o número DS-S-276/2017.

Helder Rafael Nocko  
Eng. Ambiental – CREA PR-86285/D  
Responsável Técnico  
**EnvEx Engenharia e Consultoria**

## SUMÁRIO

<b>Sumário</b> .....	<b>4</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>6</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>17</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>18</b>
1.1. Contextualização Do Estudo .....	19
1.2. Objetivos .....	21
1.3. Definição dos cenários a serem simulados .....	21
<b>2. Modelos Utilizados</b> .....	<b>24</b>
2.1. SisBaHiA® .....	24
2.1.1. Modelo de Circulação Hidrodinâmica .....	27
2.1.2. Modelo de Qualidade da Água.....	31
2.2. Delft3D® .....	53
2.2.1. Descrição do modelo de Circulação Hidrodinâmica (Delft3D-Flow).....	55
2.2.2. Transferência de calor – modelo de temperatura .....	63
2.2.3. Modelo de Qualidade da Água.....	68
<b>3. Dados Utilizados</b> .....	<b>75</b>
3.1. Topobatimetria .....	75
3.1.1. Reservatório do Xingu .....	75
3.1.2. Reservatório Intermediário.....	79
3.1.3. Trecho de Restituição de Vazão.....	81
3.2. Vazões .....	82
3.3. Parâmetros meteorológicos .....	91
3.4. Dados de qualidade da água .....	95
<b>4. Modelagens Matemáticas do Reservatório do Xingu (RX)</b> .....	<b>101</b>
4.1. Implementação das simulações de hidrodinâmica .....	101
4.2. Resultados das simulações de hidrodinâmica .....	104
4.3. Implementação das simulações de qualidade da água.....	113
4.4. Resultados das simulações de qualidade da água .....	116
4.4.1. Resultados para Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	118
4.4.2. Resultados para Oxigênio Dissolvido (OD).....	123
4.4.3. Resultados para Nitrogênio Amoniacal .....	129
4.4.4. Resultados para Nitrato .....	134
4.4.5. Resultados para Fósforo Total.....	139
4.4.6. Resultados para Clorofila-a.....	144
4.4.7. Resultados para Temperatura .....	149
<b>5. Modelagens Matemáticas do Reservatório Intermediário (RI)</b> .....	<b>154</b>
5.1. Implementação das simulações de hidrodinâmica .....	154

---

5.2.	Resultados das simulações hidrodinâmicas.....	157
5.3.	Implementação das simulações de qualidade da água.....	179
5.4.	Resultados das simulações de qualidade da água .....	180
5.4.1.	Resultados para OD .....	180
5.4.2.	Resultados para DBO .....	185
5.4.3.	Resultados para Fósforo Total.....	187
5.4.4.	Resultados para Amônia.....	191
5.4.5.	Resultados para Nitrato .....	195
5.4.6.	Resultados para Clorofila-a.....	199
5.4.7.	Resultados para Temperatura .....	203
5.4.8.	Oxigênio Dissolvido – Análise Temporal.....	207
5.4.9.	Nitrogênio Amoniacal, Nitrato e Fósforo Total – Análise Temporal.....	221
<b>6.</b>	<b>Modelagens Matemáticas do Trecho de Restituição de Vazão (TRV).....</b>	<b>227</b>
6.1.	Implementação das simulações da hidrodinâmica .....	227
6.2.	Resultados das simulações de hidrodinâmica .....	229
6.3.	Implementação das simulações de qualidade da água.....	237
6.4.	Resultados das simulações de qualidade da água .....	238
6.4.1.	Resultados para Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	239
6.4.2.	Resultados para Oxigênio Dissolvido (OD).....	244
6.4.3.	Resultados para Nitrogênio Amoniacal .....	249
6.4.4.	Resultados para Nitrato .....	254
6.4.5.	Resultados para Fósforo Total.....	259
6.4.6.	Resultados para Clorofila-a.....	264
6.4.7.	Resultados para Temperatura .....	269
<b>7.</b>	<b>Considerações Finais.....</b>	<b>275</b>
	<b>Referências.....</b>	<b>279</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processos simulados na dinâmica do fitoplâncton. ....	32
Figura 2: Processos simulados no ciclo do Nitrogênio. ....	33
Figura 3: Processos simulados no ciclo do Fósforo. ....	33
Figura 4: Processos simulados na dinâmica OD-DBO. ....	33
Figura 5: Exemplos de grade retangular (esquerda) e curvilínea (direita). ....	58
Figura 6: Coordenadas Sigma ( $\sigma$ ) (Fonte: <a href="https://www.meted.ucar.edu">https://www.meted.ucar.edu</a> ). ....	58
Figura 7: Visão geral dos mecanismos de troca de calor na superfície. ....	64
Figura 8: Esquema de uma grade estruturada com volumes finitos. Fonte: (Delft3D-WAQ, 2013). ....	72
Figura 9: Esquema geral das substâncias incluídas no módulo WAQ do Delft3D®. As substâncias são organizadas em grupos funcionais e estão indicadas pelos cabeçalhos em cinza. As principais relações são representadas pelas setas. Fonte: (Delft3D-WAQ, 2014). ....	72
Figura 10: Seções topobatimétricas para o Reservatório do Xingu. ....	77
Figura 11: Batimetria do Reservatório do Xingu. ....	78
Figura 12: Batimetria do sistema do Reservatório Intermediário. ....	80
Figura 13: Seções topobatimétricas S1 a S8 levantadas no TRV e pontos notáveis (triângulos amarelos) S2 e S8. ....	81
Figura 14: Topobatimetria utilizada nas simulações do Trecho de Restituição de Vazão (TRV). ....	82
Figura 15: Séries anuais de vazões afluentes ao RI e efluentes do RX para o RI. ....	85
Figura 16: Séries anuais de vazões turbinadas no RI e afluentes ao TRV. ....	85
Figura 17: Séries anuais de vazões afluentes e efluentes no TVR (e afluentes ao TRV), do Hidrograma B, e do ano de 2016. ....	86
Figura 18: Localização das estações de monitoramento de vazões nos igarapés. ....	88
Figura 19: Bacia de contribuição considerada pelo SWAT para o Reservatório do Xingu. ....	90
Figura 20: Localização das estações meteorológicas de Altamira e Pimental, onde foram medidos parâmetros meteorológicos (vento, temperatura do ar e umidade). ....	93
Figura 21: Médias diárias de velocidade do vento medidas nas estações meteorológicas de Altamira e de Pimental entre 2012 e 2017. ....	94
Figura 22: Médias horárias entre as velocidades do vento medidas nas estações meteorológicas de Altamira e de Pimental entre 2012 e 2017. ....	94
Figura 23: Espacialização dos pontos de monitoramento de qualidade da água utilizados para geração das condições iniciais e de contorno para as simulações do Reservatório do Xingu. ....	96
Figura 24: Domínio de modelagem para o Reservatório do Xingu. ....	103
Figura 25 – Malha do Reservatório do Xingu. ....	104
Figura 26: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1. ....	106
Figura 27: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2. ....	106
Figura 28: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3. ....	107
Figura 29: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4. ....	107
Figura 30: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5. ....	108

Figura 31: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	108
Figura 32: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	109
Figura 33: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	109
Figura 34: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	110
Figura 35: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	110
Figura 36: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	111
Figura 37: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	111
Figura 38: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	112
Figura 39: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	112
Figura 40: Evolução temporal das concentrações de DBO (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu (Barragem), e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.....	119
Figura 41: Evolução temporal das concentrações de DBO (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu (Saída RI), e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.....	119
Figura 42: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	120
Figura 43: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	120
Figura 44: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	121
Figura 45: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	121
Figura 46: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	122
Figura 47: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	122
Figura 48: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	123
Figura 49: Evolução temporal das concentrações de OD (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu (Barragem), e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.....	124
Figura 50: Evolução temporal das concentrações de OD (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu (Saída RI), e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.....	125
Figura 51: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	125
Figura 52: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	126
Figura 53: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	126
Figura 54: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	127
Figura 55: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	127

Figura 56: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	128
Figura 57: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	128
Figura 58: Evolução temporal das concentrações de Amônia (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.....	129
Figura 59: Evolução temporal das concentrações de Amônia (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.....	130
Figura 60: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	130
Figura 61: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	131
Figura 62: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	131
Figura 63: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	132
Figura 64: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	132
Figura 65: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	133
Figura 66: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	133
Figura 67: Evolução temporal das concentrações de Nitrato (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.....	134
Figura 68: Evolução temporal das concentrações de Nitrato (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.....	135
Figura 69: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	135
Figura 70: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	136
Figura 71: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	136
Figura 72: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	137
Figura 73: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	137
Figura 74: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	138
Figura 75: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	138
Figura 76: Evolução temporal das concentrações de Fósforo Total (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.....	139
Figura 77: Evolução temporal das concentrações de Fósforo Total (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.....	140
Figura 78: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	140
Figura 79: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	141
Figura 80: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	141



Figura 81: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	142
Figura 82: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	142
Figura 83: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	143
Figura 84: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	143
Figura 85: Evolução temporal das concentrações de Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) na saída do Reservatório do Xingu (Barragem), e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.....	144
Figura 86: Evolução temporal das concentrações de Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) na saída do Reservatório do Xingu (Entrada do RI), e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.....	145
Figura 87: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	145
Figura 88: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	146
Figura 89: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	146
Figura 90: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	147
Figura 91: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	147
Figura 92: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	148
Figura 93: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	148
Figura 94: Evolução temporal das temperaturas da água na saída do Reservatório do Xingu, e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.....	149
Figura 95: Evolução temporal das temperaturas da água na saída do Reservatório do Xingu, e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.....	150
Figura 96: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	150
Figura 97: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	151
Figura 98: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	151
Figura 99: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	152
Figura 100: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	152
Figura 101: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	153
Figura 102: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	153
Figura 103: Domínio de modelagem para o Reservatório Intermediário, com destaque para os pontos de entrada e saída e a localização dos Igarapés Interceptados pelos Diques.....	156
Figura 104: Malha do Reservatório Intermediário.....	157
Figura 105: Reservatório Intermediário com os pontos de monitoramento.....	158
Figura 106: Variação do nível do reservatório em escala horária – Cenário 1.....	160

Figura 107: Variação do nível do reservatório em escala horária – Cenário 6.....	160
Figura 108: Variação do nível do reservatório em escala horária – Período de 24 horas – Cenário 1....	161
Figura 109: Variação do nível do reservatório em escala horária – Período de 24 horas – Cenário 6....	161
Figura 110: Campo de velocidade integrada na vertical para o Cenário 1 em 15 de setembro. ....	163
Figura 111: Detalhe Norte do campo de velocidade integrada na vertical para o Cenário 1 em 15 de setembro. ....	163
Figura 112: Campo de velocidade integrado na vertical para o Cenário 1 em 15 de setembro – Porção central do RI. ....	164
Figura 113: Campo de velocidade horizontal para o Cenário 1 em 15 de setembro – Superfície (Branco), Fundo (Vermelho). ....	165
Figura 114: Campo de velocidade horizontal para o Cenário 1 em 15 de setembro – Superfície (Branco), Fundo (Vermelho). ....	166
Figura 115: Diferença de velocidade entre a superfície e o fundo para o Cenário 1 em 15 de setembro. ....	166
Figura 116: Diferença de temperatura entre superfície e fundo, Cenário 1 – 15 de setembro. ....	167
Figura 117: Evolução temporal da temperatura interior do Canal de Derivação – Cenário 1.....	168
Figura 118: Evolução temporal campo de velocidade interior do Canal de Derivação – Cenário 1. ....	169
Figura 119: Evolução temporal da temperatura Reservatório 2 – Cenário 1.....	170
Figura 120: Evolução temporal da velocidade no ponto Reservatório 2 – Cenário 1.....	171
Figura 121: Campo de velocidade integrado na vertical - Cenário 6, 15 de setembro. ....	172
Figura 122: Detalhe Norte do campo de velocidade integrado na vertical - Cenário 6, 15 de setembro. ....	173
Figura 123: Campo de velocidade integrado na vertical – Detalhe próximo do fim do Canal de Derivação entrando no RI - Cenário 6, 15 de setembro. ....	173
Figura 124: Campo de velocidade horizontal. Cenário 6, 15 de setembro – Superfície (Branco) e fundo (Vermelho).....	174
Figura 125: Campo de velocidade horizontal. Cenário 6, 15 de setembro – Superfície (Branco) e fundo (Vermelho).....	174
Figura 126: Diferença de velocidade entre a superfície e o fundo Cenário 1 - 15 de setembro. ....	175
Figura 127: Diferença de temperatura entre superfície e fundo Cenário 6 – 15 de setembro. ....	176
Figura 128: Evolução temporal da temperatura interior do Canal de Derivação – Cenário 6.....	177
Figura 129: Evolução temporal da temperatura no ponto Reservatório 2 – Cenário 6.....	178
Figura 130: Evolução temporal da velocidade no ponto Reservatório 2 – Cenário 6.....	178
Figura 131: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1. ....	181
Figura 132: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2. ....	182
Figura 133: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3 ....	182
Figura 134: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4 ....	183
Figura 135: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5 ....	183
Figura 136: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6 ....	184
Figura 137. Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7 ....	184
Figura 138: Concentração superficial de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1..	185
Figura 139: Concentração superficial de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6..	186
Figura 140: Concentração superficial de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7..	186
Figura 141: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	188
Figura 142: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	188

Figura 143: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	189
Figura 144: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	189
Figura 145: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	190
Figura 146: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	190
Figura 147: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	191
Figura 148: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	192
Figura 149: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	192
Figura 150: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	193
Figura 151: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	193
Figura 152: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	194
Figura 153: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	194
Figura 154: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	195
Figura 155: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	196
Figura 156: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	196
Figura 157: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	197
Figura 158: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	197
Figura 159: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	198
Figura 160: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	198
Figura 161: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	199
Figura 162: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	200
Figura 163: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	200
Figura 164: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	201
Figura 165: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	201
Figura 166: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	202
Figura 167: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	202
Figura 168: Concentração superficial de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	203
Figura 169: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	204
Figura 170: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	204

Figura 171: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.	205
Figura 172: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.	205
Figura 173: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.	206
Figura 174: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.	206
Figura 175: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.	207
Figura 176: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.	208
Figura 177: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 6.	209
Figura 178: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 6.	210
Figura 179: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 6.	210
Figura 180: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.	211
Figura 181: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 2.	212
Figura 182: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 2.	212
Figura 183: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 2.	213
Figura 184: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.	214
Figura 185: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 3.	215
Figura 186: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 3.	215
Figura 187: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 3.	216
Figura 188: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.	217
Figura 189: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 4.	217
Figura 190: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 4.	218
Figura 191: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 4.	218
Figura 192: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.	219
Figura 193: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 5.	220
Figura 194: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 5.	220
Figura 195: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 5.	221
Figura 196: Evolução temporal de NO <sub>3</sub> ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 6.	222
Figura 197: Evolução temporal de NO <sub>3</sub> ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 6.	223
Figura 198: Evolução temporal de NO <sub>3</sub> ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 6.	223
Figura 199: Evolução temporal de NH <sub>4</sub> ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 6.	224
Figura 200: Evolução temporal de NH <sub>4</sub> ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 6.	224
Figura 201: Evolução temporal de NH <sub>4</sub> ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 6.	225
Figura 202: Evolução temporal de Fósforo Total ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 6.	225
Figura 203: Evolução temporal de Fósforo Total ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 6.	226
Figura 204: Evolução temporal de Fósforo Total ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 6.	226
Figura 205: Malha do Trecho de Restituição de Vazão.	228
Figura 206: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.	230

Figura 207: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2. ....	230
Figura 208: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3. ....	231
Figura 209: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4. ....	231
Figura 210: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5. ....	232
Figura 211: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6. ....	232
Figura 212: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7. ....	233
Figura 213: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1. ....	233
Figura 214: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2. ....	234
Figura 215: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3. ....	234
Figura 216: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4. ....	235
Figura 217: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5. ....	235
Figura 218: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6. ....	236
Figura 219: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7. ....	236
Figura 220: Evolução temporal das concentrações de DBO (mg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão. ....	240
Figura 221: Evolução temporal das concentrações de DBO (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão. ....	240
Figura 222: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1. ....	241
Figura 223: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2. ....	241
Figura 224: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3. ....	242
Figura 225: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4. ....	242
Figura 226: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5. ....	243
Figura 227: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6. ....	243
Figura 228: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7. ....	244
Figura 229: Evolução temporal das concentrações de OD (mg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão. ....	245
Figura 230: Evolução temporal das concentrações de OD (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão. ....	245
Figura 231: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1. ....	246

Figura 232: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	246
Figura 233: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	247
Figura 234: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	247
Figura 235: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	248
Figura 236: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	248
Figura 237: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	249
Figura 238: Evolução temporal das concentrações de Amônia (mg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão. ....	250
Figura 239: Evolução temporal das concentrações de Amônia (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão.....	250
Figura 240: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	251
Figura 241: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	251
Figura 242: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	252
Figura 243: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	252
Figura 244: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	253
Figura 245: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	253
Figura 246: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	254
Figura 247: Evolução temporal das concentrações de Nitrato (mg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão. ....	255
Figura 248: Evolução temporal das concentrações de Nitrato (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão.....	255
Figura 249: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	256
Figura 250: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	256
Figura 251: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	257
Figura 252: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	257
Figura 253: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	258
Figura 254: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	258
Figura 255: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	259
Figura 256: Evolução temporal das concentrações de Fósforo Total (mg/L) no ponto Est A, após o ponto de restituição de vazão.....	260

Figura 257: Evolução temporal das concentrações de Fósforo Total (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão. ....	260
Figura 258: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	261
Figura 259: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	261
Figura 260: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	262
Figura 261: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	262
Figura 262: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	263
Figura 263: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	263
Figura 264: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	264
Figura 265: Evolução temporal das concentrações de Clorofila-a (µg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão.....	265
Figura 266: Evolução temporal das concentrações de Clorofila-a (µg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão. ....	265
Figura 267: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	266
Figura 268: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	266
Figura 269: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	267
Figura 270: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	267
Figura 271: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	268
Figura 272: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	268
Figura 273: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....	269
Figura 274: Evolução temporal da temperatura no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão. ....	270
Figura 275: Evolução temporal da temperatura no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão. ....	270
Figura 276: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.....	271
Figura 277: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.....	271
Figura 278: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.....	272
Figura 279: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.....	272
Figura 280: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.....	273
Figura 281: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.....	273

---

Figura 282: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.....274



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vazões do hidrograma B (Resolução ANA N°48, de 28 de fevereiro de 2011).....	20
Tabela 2: Variáveis simuladas no modelo .....	32
Tabela 3: Lista de parâmetros e coeficientes usados no SisBaHiA®, com valores usuais. ....	50
Tabela 4: Substâncias e processos modelados no DELFT3D-WAQ.....	69
Tabela 5: Principais parâmetros e sua descrição.....	73
Tabela 6: Vazões da estação de Altamira para o ano de 2016. ....	83
Tabela 7: Vazões de entrada ( $Q_{RI}$ ) e saída ( $Q_{turb}$ ) do RI durante o período de estiagem para um período de 24 horas. ....	86
Tabela 8: Valores de vazão ( $m^3/s$ ) considerados para os Igarapés de Altamira, Painelas e Ambé. ....	89
Tabela 9: Valores de vazão ( $m^3/s$ ) de 16 sub-bacias que deságuam diretamente no Reservatório do Xingu .....	90
Tabela 10: Valores de vazão ( $m^3/s$ ) das outras 16 sub-bacias que deságuam diretamente no Reservatório do Xingu.....	91
Tabela 11: Valores de vazão remanescente dos igarapés interceptados pelos diques .....	91
Tabela 12: Pontos de medição de qualidade da água utilizados para a geração das condições de contorno e iniciais das simulações de qualidade da água do reservatório do Xingu.....	95
Tabela 13: Dados de qualidade da água utilizados na geração das condições iniciais e de contorno para as simulações de qualidade da água do reservatório do Xingu. ....	97
Tabela 14: Condições iniciais utilizadas nas modelagens de qualidade da água do Reservatório do Xingu.....	113
Tabela 15: Parâmetros utilizados na simulação numérica do modelo de qualidade da água. ....	115
Tabela 16: Limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para rios de Classe 2 e ambientes intermediários.....	117
Tabela 17: Variação do nível em função da operação por pulsos.....	162
Tabela 18: Principais parâmetros, sua descrição e valor utilizado na modelagem. ....	179
Tabela 19: Condições iniciais utilizadas nas modelagens de qualidade da água do TRV. ....	238

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem matemática é uma ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos, podendo subsidiar as decisões de gerenciamento, o enquadramento dos cursos d'água em classes preponderantes de uso e a outorga dos direitos. Modelos são particularmente úteis quando usados como ferramenta de comparação ao se estabelecer metas a serem alcançadas no sentido de minimizar impactos decorrentes, por exemplo, da formação e operação de reservatórios. Cenários podem ser propostos no sentido de simular diferentes intervenções; com isso é possível analisar, por exemplo, as características hidrodinâmicas do sistema e os indicadores de qualidade de água. Se uma mesma base é usada (domínio e variáveis iguais), é possível comparar alternativas ou intervenções, mesmo que os resultados numéricos não sejam necessariamente exatos (Reckhow 1994). Nesse contexto, modelagens matemáticas da hidrodinâmica e da qualidade da água do Reservatório do Xingu (RX), do Reservatório Intermediário (RI), e do Trecho de Restituição de Vazão (TRV) foram desenvolvidas no sentido de avaliar diferentes possibilidades de operação da UHE Belo Monte em períodos de estiagem. Para tanto, considerando os objetivos desse estudo, foram utilizados os modelos Delft3D® e SisBaHiA®. Salienta-se que, embora as modelagens matemáticas apresentadas nesse estudo permitam a análise dos processos dominantes e de suas ordens de grandeza, análises de maior precisão deverão ser adotadas após a calibração dos modelos para os reservatórios. Tais modelagens estão previstas para acontecer de acordo com o parágrafo 11 do artigo 1º da Resolução 48/2011 da Agência Nacional de Águas.

As próximas seções deste capítulo apresentam a contextualização do estudo, os objetivos, e a definição dos cenários a serem simulados. Posteriormente, o Capítulo 2 apresenta a descrição dos modelos utilizados; no Capítulo 3 são apresentados os dados e informações utilizados nas simulações. As modelagens matemáticas são apresentadas nos Capítulos 4, 5 e 6, respectivamente para o Reservatório do Xingu, Reservatório Intermediário e Trecho de Restituição de Vazão – nesses capítulos, além da descrição da forma de implementação dos modelos de hidrodinâmica e de qualidade da água, são

apresentados os resultados mais relevantes obtidos para cada trecho e para cada cenário. No Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais desse estudo.

### 1.1. Contextualização Do Estudo

A UHE Belo Monte se caracteriza por ser uma usina de derivação, onde o barramento principal localiza-se no sítio Pimental, formando o reservatório do Xingu (RX); o desvio das águas do rio Xingu ocorre por um Canal de Derivação com extensão de 16,2 km – este canal alimenta o Reservatório Intermediário (RI), o qual faz a adução da Casa de Força Principal no sítio Belo Monte. O empreendimento apresenta baixa capacidade de acumulação, operando em regime de fio d'água, sendo que o nível do Reservatório do Xingu, em Pimental, se situa na elevação de 97,00 m. A principal afluição ao RI é proveniente do RX. Além disso, na saída do RX há um Trecho de Vazão Reduzida (TVR) localizado na Volta Grande do Xingu; após o turbinamento na casa de força principal no RI está o Trecho de Restituição de Vazão (TRV) onde ocorre o encontro das águas provenientes do TVR e das águas efluentes do RI.

Considerando as baixas vazões apresentadas para o período de vazante e seca nos dois ciclos após o enchimento dos reservatórios (anos de 2016 e 2017), foram feitas diversas tratativas junto à Agência Nacional de Águas (ANA) e ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) com a intenção de verificar possibilidades de alteração em termos de vazão afluente ao Reservatório Intermediário, com o intuito de atender questões de operação das Unidades Geradoras da Casa de Força Principal (sítio Belo Monte) e manter a qualidade da água, tendo em vista a preservação da vida aquática no corpo de água formado, no caso o Reservatório Intermediário da UHE Belo Monte.

Para tanto, a ANA solicitou detalhamento e simulações matemáticas considerando as baixas vazões para o Reservatório Intermediário nos períodos de vazante e seca do rio Xingu, além da operação das Unidades Geradoras em conformidade com a Resolução ANA 2046/2011 (que altera a Resolução ANA 48/2011) a qual estabelece o que se segue:

- A vazão mínima a ser mantida no Reservatório Intermediário é de 300 m<sup>3</sup>/s, a qual poderá ser operada em pulsos, desde que a média da vazão a cada dois dias seja sempre igual ou superior a este valor;
- As vazões médias mensais a serem mantidas no Trecho de Vazão Reduzida (TVR) são as do hidrograma B (Resolução ANA nº. 48 de 28 de fevereiro de 2011), conforme apresentado na tabela a seguir:

Tabela 1: Vazões do hidrograma B (Resolução ANA Nº48, de 28 de fevereiro de 2011).

Hidrograma B			
Mês	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Mês	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
Jan	1100	Jul	1200
Fev	1600	Ago	900
Mar	4000	Set	750
Abr	8000	Out	700
Mai	4000	Nov	800
Jun	2000	Dez	900

- Caso, em dado mês, a vazão afluyente ao Reservatório do Xingu seja inferior à prescrita no Anexo III da Resolução 48 da ANA, deve ser mantida vazão igual à afluyente no TVR;
- O NA mínimo do Reservatório do Xingu poderá ser reduzido para atender simultaneamente as condições expressas nos incisos I e II, quando a vazão afluyente for inferior à vazão prescrita para o TVR somada a 300 m<sup>3</sup>/s;
- A vazão instantânea no TVR, durante o mês de outubro, não poderá ser inferior a 700 m<sup>3</sup>/s, exceto caso a vazão afluyente o seja;
- Nos meses de ascensão do hidrograma, a vazão instantânea no TVR não deverá ser inferior à vazão média prescrita para o mês anterior, exceto caso a vazão afluyente o seja;
- Nos meses de recessão do hidrograma, a vazão instantânea no TVR não deverá ser inferior à vazão média prescrita para o mês seguinte, exceto caso a vazão afluyente o seja.

Nesse contexto, considerando a possibilidade de vazões afluentes baixas no rio Xingu, é necessário simular a condição de estiagem na qual a vazão natural afluyente tende a ser inferior à soma do valor a ser liberado para o TVR, mais 300 m<sup>3</sup>/s, valor esse que será simulado reduzindo-se em intervalos de 50 m<sup>3</sup>/s até a vazão zero, no limite de deplecionamento dos reservatórios do Xingu e Intermediário, o qual é de 95,20 m.

## 1.2. Objetivos

Considerando o exposto na seção anterior, os objetivos deste estudo são descritos a seguir.

**Objetivo Principal:** Realizar o prognóstico do comportamento da qualidade das águas do Reservatório Intermediário, no período de estiagem, sujeito a diferentes vazões de alimentação do mesmo a partir do Reservatório Xingu por meio do Canal de Derivação. Para tanto, deve-se considerar a operação parcial das máquinas de Belo Monte operando com vazões variando de 50 em 50 m<sup>3</sup>/s, na faixa de 50 a 300 m<sup>3</sup>/s.

### **Objetivos secundários:**

- Realizar o prognóstico da qualidade da água do Reservatório do Xingu, considerando cenários de estiagem;
- Realizar o prognóstico da qualidade da água do Trecho de Restituição de Vazão, considerando as simulações do RX e RI a serem realizadas;
- Utilizar dados históricos obtidos durante a execução do Projeto Básico Ambiental (PBA) da UHE Belo Monte – esses dados compreendem medições realizadas nas estações climatológicas, vazões medidas nos pontos de monitoramento hidrométrico e dados obtidos nos pontos de monitoramento de qualidade de água.

## 1.3. Definição dos cenários a serem simulados

Para atender os objetivos apresentados na seção anterior, serão realizadas as seguintes simulações:

- Estudo da qualidade da água resultante do deplecionamento do Reservatório do Xingu e, conseqüentemente do RI, ligado ao mesmo por meio do Canal de Derivação, no período de vazões críticas de estiagem considerando as seguintes opções de operação das turbinas na Casa de Força Principal (no RI):
  - Vazão do Reservatório Intermediário = Vazão turbinada ( $Q_{Turb}$ );
  - Cenários com pulsos de  $Q_{Turb}$  conforme especificado abaixo:
    - $Q_{Turb} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
    - $Q_{Turb} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$  por 2 horas/dia (média diária de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ );
    - $Q_{Turb} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$  por 4 horas/dia (média diária de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ );

- $Q_{Turb} = 600\text{m}^3/\text{s}$  por 6 horas/dia (média diária de  $150\text{ m}^3/\text{s}$ );
- $Q_{Turb} = 600\text{m}^3/\text{s}$  por 8 horas/dia (média diária de  $200\text{ m}^3/\text{s}$ );
- $Q_{Turb} = 600\text{m}^3/\text{s}$  por 10 horas/dia (média diária de  $250\text{ m}^3/\text{s}$ );
- $Q_{Turb} = 600\text{m}^3/\text{s}$  por 12 horas/dia (média diária de  $300\text{ m}^3/\text{s}$ );
- Vazão de engolimento de 1 máquina =  $600\text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Turbinamento até a depleção chegar à cota 95,20 m;
- Período seco correspondente ao período de julho a dezembro.
- Modelagem da estratificação térmica do Reservatório Intermediário, resultando na identificação (ou não) diária e/ou sazonal, na espessura do epilímnio – camada superficial bem misturada – e nos perfis de temperatura ao longo do tempo nos pontos onde houver estratificação considerável.

Na modelagem de qualidade da água do Reservatório Intermediário será considerado o vertimento nos igarapés interceptados pelos seguintes diques:

- Dique 28: Igarapé Paquiçamba;
- Dique 19B: Igarapé Ticaruca;
- Dique 14C: Igarapé Cajueiro;
- Dique 13: Igarapé Cobal; e
- Dique 8B: Igarapé Aturiá.

Será considerado o vertimento para um ano hidrológico seco, considerando a operação hidráulico-energética proposta. Serão apresentados resultados em mapas de concentração dos seguintes parâmetros de qualidade da água:

- Temperatura;
- Oxigênio Dissolvido;
- Demanda Bioquímica de Oxigênio;
- Fósforo;
- Amônia; e
- Clorofila-a.

Assim, considerando os objetivos do estudo e as condições listadas acima, os cenários a serem simulados compreendem as diferentes possibilidades de operação em pulso das turbinas da UHE Belo Monte:

- **Cenário 1 (C1):** vazão afluyente média diária ao RI de 50 m<sup>3</sup>/s, com turbinamento de 600 m<sup>3</sup>/s durante 2 horas/dia;
- **Cenário 2 (C2):** vazão afluyente média diária ao RI de 100 m<sup>3</sup>/s, com turbinamento de 600 m<sup>3</sup>/s durante 4 horas/dia;
- **Cenário 3 (C3):** vazão afluyente média diária ao RI de 150 m<sup>3</sup>/s, com turbinamento de 600 m<sup>3</sup>/s durante 6 horas/dia;
- **Cenário 4 (C4):** vazão afluyente média diária ao RI de 200 m<sup>3</sup>/s, com turbinamento de 600 m<sup>3</sup>/s durante 8 horas/dia;
- **Cenário 5 (C5):** vazão afluyente média diária ao RI de 250 m<sup>3</sup>/s, com turbinamento de 600 m<sup>3</sup>/s durante 10 horas/dia;
- **Cenário 6 (C6):** vazão afluyente média diária ao RI de 300 m<sup>3</sup>/s, com turbinamento de 600 m<sup>3</sup>/s durante 12 horas/dia;
- **Cenário 7 (C7):** vazão afluyente ao RI é nula.

Para cada cenário serão realizadas simulações de hidrodinâmica e de qualidade da água, separadamente, para o Reservatório do Xingu (RX), para o Reservatório Intermediário (RI), e para o Trecho de Restituição de Vazão (TRV).

Para implementação dos cenários é necessário conhecer as vazões afluentes e efluentes de cada um dos compartimentos que serão modelados – RX, RI, e TRV. Além disso, também são necessários dados de intensidade e direção do vento, de batimetria e de qualidade da água. Os dados utilizados nas simulações serão apresentados no Capítulo 3.

Novamente é importante mencionar que a modelagem matemática é uma simplificação dos processos, físicos e químicos, que ocorrem na natureza e apresenta imprecisões. No entanto, os resultados, mesmo sem calibração, permitem a análise dos processos dominantes e de suas respectivas ordens de grandeza, dando suporte técnico para a gestão ambiental e para a tomada de decisões em relação à operação do reservatório.

## 2. MODELOS UTILIZADOS

Para atender os objetivos deste estudo foram utilizados modelos capazes de simular a hidrodinâmica, a qualidade da água, e a estratificação térmica e química do reservatório. Para as modelagens do Reservatório do Xingu e para o Trecho de Restituição de Vazão foi utilizado o sistema de modelos SisBaHiA<sup>®</sup>. Para o Reservatório Intermediário, para uma avaliação tridimensional mais acurada do comportamento das variáveis DBO, OD, Nitrogênio, Fósforo, Clorofila-a e temperatura, foi utilizado o sistema de modelos Delft3D<sup>®</sup>. Nesse contexto, na sequência é apresentada a descrição dos módulos dos dois sistemas de modelos utilizados nesse estudo, bem como a justificativa de escolha de cada um deles.

### 2.1. SisBaHiA<sup>®</sup>

O sistema de modelos SisBaHiA<sup>®</sup>- **Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental** está em desenvolvimento pela COPPE/UFRJ desde 1987. O SisBaHiA<sup>®</sup> é continuamente ampliado e aperfeiçoado por meio de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema já foi adotado em mais de cem estudos e projetos envolvendo modelagem de corpos de água naturais e artificiais, dentre eles reservatórios, rios, estuários e baías. Ele vem sendo amplamente usado no Brasil para simular enchimento e qualidade da água de reservatórios de usinas hidrelétricas, dentre eles os da própria UHE Belo Monte, além da UHE Santo Antônio, e UHE Jirau, sendo bastante respeitado e eficiente nessas aplicações.

O SisBaHiA<sup>®</sup> é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação COPPETEC, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

O SisBaHiA<sup>®</sup> é capaz de realizar modelagem ambiental de corpos de água e é constituído por um conjunto de modelos, dentre os quais estão o modelo de circulação



hidrodinâmica bidimensional e o modelo de qualidade de água e eutrofização – ambos utilizados nesse estudo.

O modelo de qualidade da água simula os processos físicos e químicos envolvidos na dinâmica de substâncias específicas (Nitrogênio, Fósforo, OD, DBO, Clorofila-a, entre outros), e a interação entre elas – sua utilização requer que o modelo hidrodinâmico seja simulado anteriormente.

Todas as simulações com este modelo foram realizadas utilizando as versões 2DH, ou seja, foram consideradas variações nas duas direções horizontais, mantendo-se valores constantes na vertical. A modelagem bidimensional permite observar variações espaciais nos resultados, o que, ao mesmo tempo em que torna a resolução do problema menos complexa quando comparada a modelos tridimensionais, também fornece resultados de melhor qualidade nas situações aqui consideradas.

Em termos hidrodinâmicos, a modelagem bidimensional também considera o formato do reservatório, a ocorrência de curvas e de regiões de estagnação. Já na qualidade da água, a hipótese bidimensional permite considerar a localização de fontes, permitindo uma representação mais realística da distribuição espacial das concentrações das substâncias. A desvantagem do uso de modelos 2DH é que estes não consideram variações na vertical, não podendo, portanto, simular gradientes verticais. Entende-se, no entanto, que a utilização do modelo bidimensional de qualidade da água do SisBaHia<sup>®</sup>, que considera valores médios na vertical, não gera erros significativos nos resultados das simulações realizadas nesse estudo, principalmente em função das características do Reservatório do Xingu, sabidamente um reservatório com pequeno tempo de residência e relativamente pouco profundo quando comparado ao RI. Além disso, o foco principal desse estudo é a análise dos efeitos à qualidade da água em função de diferentes cenários de operação dos reservatórios da UHE Belo Monte.

O modelo de qualidade de água do SisBaHia<sup>®</sup> consiste na solução da equação do balanço de massa para cada substância de interesse. Ou seja, resolve um modelo de transporte euleriano para cada constituinte. O modelo simula até 11 variáveis de

qualidade de água e indicadores de eutrofização incluindo salinidade, temperatura, OD, DBO, nutrientes compostos de Nitrogênio e de Fósforo e biomassa.

O modelo de qualidade de água considera o transporte bidimensional, ou seja, integrado na vertical, para escalares passivos e não-conservativos. Nas regiões onde as profundidades são relativamente pequenas e os padrões de estratificação fracos, a velocidade das correntes e o transporte podem ser bem representados por meio de variáveis médias na vertical. Nestes casos as equações governantes são promediadas na dimensão vertical reduzindo a dimensão do problema. Neste tipo de aplicação, o campo de velocidades deve ser conhecido, ou seja, o escalar transportado não altera a hidrodinâmica do corpo de água receptor. Como consequência, a modelagem do padrão hidrodinâmico do corpo de água e a modelagem do transporte do escalar são problemas desacoplados. O transporte de uma dada substância em um corpo de água é dominado pela advecção, sugerindo uma dependência entre a simulação hidrodinâmica e o processo de transporte. Sendo assim, a simulação do padrão de circulação hidrodinâmico é essencial na estrutura computacional quando da modelagem de variáveis de qualidade de água.

O modelo de qualidade da água e eutrofização do SisBaHiA<sup>®</sup> considera os ciclos do Oxigênio, do Nitrogênio e do Fósforo, além de biomassa de fitoplâncton e zooplâncton. Como as reações cinéticas modeladas variam com a temperatura, o modelo foi construído considerando as seguintes variáveis (escalares): Temperatura, Amônia, Nitrato, Fósforo Inorgânico, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Oxigênio Dissolvido (OD), Nitrogênio Orgânico, Fósforo Orgânico e Clorofila-a. Assim, são analisadas as mudanças das concentrações dessas variáveis em função das cargas afluentes. Isso permite avaliar possíveis impactos ambientais e usar a ferramenta de modelagem disponibilizada pelo SisBaHiA<sup>®</sup> como um suporte à gestão ambiental da área de interesse.

Com base nos textos da referência técnica e no manual, na sequência é apresentada a descrição dos módulos utilizados no desenvolvimento deste estudo;

maiores informações sobre o SisBaHiA<sup>®</sup> podem ser encontradas em <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>.

### 2.1.1. **Modelo de Circulação Hidrodinâmica**

O modelo de circulação hidrodinâmica 2DH (bidimensional) do SisBaHiA<sup>®</sup> considera forçantes barotrópicos, e foi desenvolvido para corpos de água nos quais efeitos de densidade variável possam ser desprezados, sendo capaz de desenvolver uma ótima representação de escoamentos em domínios naturais com geometria complexa. Processos de calibração são minimizados devido ao fato da discretização espacial via elementos finitos quadráticos permitir um bom mapeamento de corpos de água, e ótima representação de contornos recortados e batimetrias complexas – usuais em corpos de água.

No desenvolvimento de um sistema neste contexto, uma série de atributos de modelagem deve ser incorporada aos modelos à medida que estes são continuamente desenvolvidos. Isso inclui características necessárias à modelagem adequada de diversos corpos de água naturais, facilidades para exibição dos resultados, características que aumentem a confiabilidade e aceitação dos modelos, e que permitam que tais modelos sejam aperfeiçoados e adaptados para estudos futuros, ou otimizados para estudos específicos. Os seguintes atributos podem ser considerados no continuado desenvolvimento do SisBaHiA<sup>®</sup>:

- A estratégia de discretização espacial é otimizada para corpos de água naturais, pois permite excepcional detalhamento de contornos recortados e batimetrias complexas. A discretização espacial é preferencialmente feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, mas pode igualmente ser feita via elementos finitos triangulares quadráticos ou combinação de ambos. Tal método de discretização espacial é potencialmente de quarta ordem.
- Tensões e difusividades turbulentas são modeladas de uma maneira que torne a calibragem dos modelos diretamente relacionada a variáveis naturais. O emprego de esquemas auto-ajustáveis para a turbulência em escala sub-malha minimiza a necessidade de calibragem. A modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem que levam à simulação de

grandes vórtices, ou vórtices resolvíveis. Tal técnica é conhecida na literatura internacional como *LES*, sigla de *Large Eddy Simulation*.

- O modelo hidrodinâmico admite especificação pontual do tipo de material de fundo, e usa interpolação biquadrática para valores de profundidade e rugosidade equivalente do fundo, permitindo ótima acurácia na representação física do leito. Além disso, permite que o atrito no fundo seja variável no tempo e no espaço. Tal realismo é extremamente relevante para simulações de escoamentos em rios e reservatórios.
- O modelo de circulação hidrodinâmica 2DH (bidimensional) do SisBaHiA<sup>®</sup> calcula campos de velocidades promediadas na vertical, 2DH, sendo usado se o interesse estiver voltado para regiões nas quais as acelerações advectivas ao longo da coluna de água sejam pouco relevantes.
- Várias opções para resultados de formato gráfico estão incluídas no SisBaHiA<sup>®</sup>. Entretanto, o resultado dos modelos pode ser exportado e usado em qualquer programa gráfico.
- Os modelos são baseados em esquemas numéricos bem estabelecidos, para garantia de validade e aceitação.

A seguir descrevem-se em detalhes aspectos relativos ao módulo promediado na vertical (2DH) do modelo hidrodinâmico do SisBaHiA<sup>®</sup>.

Para cada intervalo de tempo, o módulo 2DH determina as componentes das velocidades médias na vertical, na direção  $x$  e  $y$ ,  $U(x, y, t)$  e  $V(x, y, t)$ , respectivamente, e as elevações da superfície livre,  $z = \zeta(x, y, t)$ . As componentes da velocidade resolvível, média na vertical, podem ser definidas como:

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u(x, y, z, t) dz \quad , \quad V(x, y, t) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v(x, y, z, t) dz$$

Considerando esta definição e supondo uma batimetria permanente durante o período de simulação, i.e.,  $z = -h(x, y)$ , a equação da continuidade, ou imposição da condição de escoamento incompressível pode ser reescrita para um escoamento 2DH integrado ao longo da vertical, como segue:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = \underbrace{q_P - q_E \pm q_I}_{\Sigma q} \quad \therefore \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q$$

Vale lembrar que os termos que compõem  $\Sigma q$  podem resultar diretamente de condições de contorno apropriadas na superfície livre e no fundo.

Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção  $x$ :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\Phi \sin \theta V - \frac{U}{H} \Sigma q$$

Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção  $y$ :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\Phi \sin \theta U - \frac{V}{H} \Sigma q$$

Nas equações anteriores,  $\tau_i^S$  e  $\tau_i^B$  são as tensões de atrito na superfície livre e no fundo, respectivamente. Essas tensões surgem das condições de contorno dinâmicas na superfície livre e no fundo, quando os termos relativos às tensões nas equações, são integrados ao longo da vertical.  $\rho_o$  é uma densidade constante de referência e  $\Phi$  é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local. Os termos com  $\Phi$  são as forças de Coriolis, no qual  $\theta$  é o ângulo de Latitude. As acelerações de Coriolis apresentadas nessas equações consideram apenas o efeito devido às componentes horizontais do campo de escoamento, já que a componente vertical do campo de velocidades é desprezível em escoamentos de grande escala em corpos de água relativamente rasos.

Como é usual em modelos de escoamento com superfície livre, o atrito na superfície livre devido ao vento também é escrito em termos de uma formulação de velocidade quadrática:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i \quad ; [i = 1,2]$$

onde  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar,  $C_D$  é o coeficiente de arraste do vento,  $W_{10}$  é o valor local da velocidade do vento medida a 10 metros acima da superfície livre, e  $\phi_i$  é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção  $x_i$ . O coeficiente de arraste do vento,  $C_D$ , pode ser determinado a partir de uma série de fórmulas empíricas. A fórmula adotada no SisBaHiA<sup>®</sup> é a apresentada por Wu em 1982:

$$C_D = (0.80 + 0.065W_{10}) \times 10^{-3} \quad ; [W_{10} \text{ em m.s}^{-1}]$$

A tensão de atrito no fundo é calculada através da seguinte expressão:

$$\tau_i^B = \rho_o \beta U_i \quad [i = 1,2]$$

onde o parâmetro  $\beta$  tem-se:

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2}$$

onde  $C_h$  é o coeficiente de Chézy, definido como:

$$C_h = 18 \log_{10} \left( \frac{12H}{2\varepsilon} \right) = 18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right),$$

onde  $2\varepsilon$  é a altura da rugosidade equivalente do fundo, sendo  $\varepsilon$  a amplitude.

Utilizando o modelo de turbulência baseado na técnica de filtragem para um escoamento promediado na vertical chega-se a:

$$\frac{\bar{\tau}_{ij}}{\rho_o} = \underbrace{\frac{\Lambda_k^2}{24} \left( \left| \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right| \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| + \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| \right)}_{\text{termos de filtragem}} + \underbrace{(D_H + D_V) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)}_{\substack{\text{difusão turbulenta e dispersão horizontal} \\ \text{de momentum}}},$$

onde como no caso anterior,  $i, j = 1, 2$  e  $k = 1, 2, 3$ , com  $k = 3$  correspondendo ao tempo  $t$  (neste contexto  $x_3 = t$ ). Os parâmetros  $\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k$  são escalas de largura de filtragem local na dimensão  $x_k$ , sendo  $\alpha_k$  constantes de calibração. O valor de  $\alpha_k$  calibra a quantidade de dissipação dada pelos termos de filtragem. Valores usuais para  $\alpha_k$  estão entre 0,25 e 2,0, e na maioria das vezes o valor 1,0 fornece bons resultados.  $D_H$  é o coeficiente de viscosidade turbulenta, promediado na vertical, no plano horizontal, e  $D_v$  é o coeficiente de dispersão horizontal da quantidade de movimento.

### 2.1.2. **Modelo de Qualidade da Água**

Nesta seção é apresentada uma descrição do modelo de qualidade da água, com destaque para a formulação das equações das reações cinéticas e para as variáveis que foram utilizadas na modelagem da qualidade de água do reservatório da UHE Belo Monte.

O modelo de Qualidade de Água e Eutrofização, integrado na vertical, considera escalares passivos e não-conservativos. Escalares não-conservativos, que representam a maioria das substâncias existentes na água, sofrem modificação de concentração através de processos físicos, biológicos e químicos. Os processos biológicos e químicos, chamados de reações cinéticas, são definidos para cada substância, sendo, portanto o diferencial deste modelo. O entendimento e a formulação destes processos são fundamentais para a construção do modelo de qualidade de água. Neste modelo, o campo de velocidades é conhecido, ou seja, o escalar transportado não altera a hidrodinâmica do corpo de água receptor. O modelo de qualidade da água e eutrofização do SisBaHiA<sup>®</sup> considera o ciclo do Oxigênio, do Nitrogênio e do Fósforo, além de biomassa de fitoplâncton e zooplâncton. Como as reações cinéticas modeladas variam fortemente com a temperatura e salinidade, o modelo foi construído considerando os seguintes 11 escalares, mostrados na Tabela 2. Um parâmetro representativo do consumo de oxigênio pelo “sedimento” de fundo é considerado; este parâmetro é denominado SOD (sediment oxygen demand) e são utilizados valores típicos conforme bibliografia especializada.

Tabela 2: Variáveis simuladas no modelo

Símbolo	Variável	Unidade
S	Salinidade	ups
T	Temperatura	°C
C1	Amônia	mg/L
C2	Nitrato	mg/L
C3	Fósforo Inorgânico	mg/L
C4	Zooplâncton Herbívoro	mg/L
C5	Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L
C6	Oxigênio Dissolvido	mg/L
C7	Nitrogênio Orgânico	mg/L
C8	Fósforo Orgânico	mg/L
C9	Clorofila-a	µg/L

As Figuras a seguir representam os diferentes processos relacionados ao modelo em termos de qualidade da água:

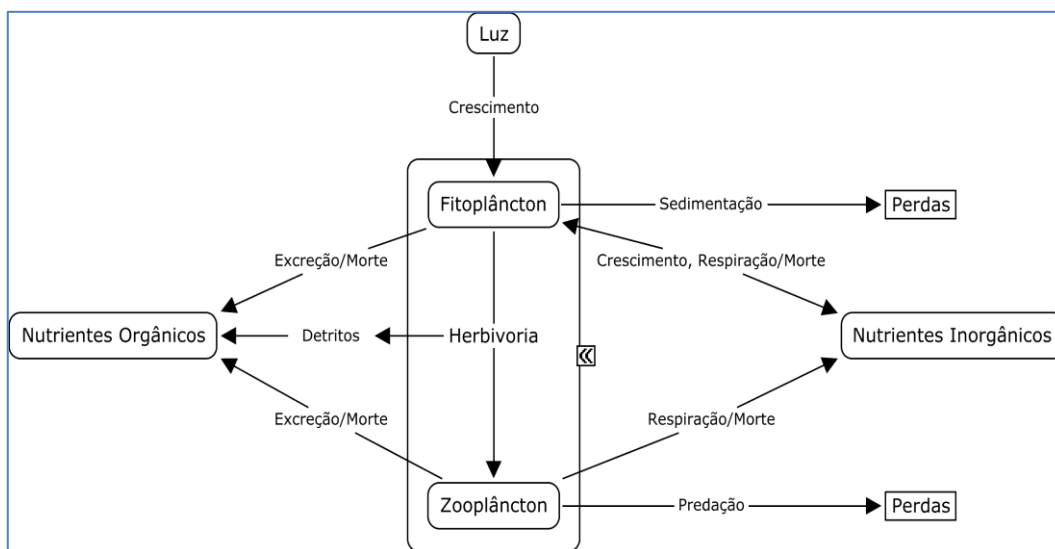
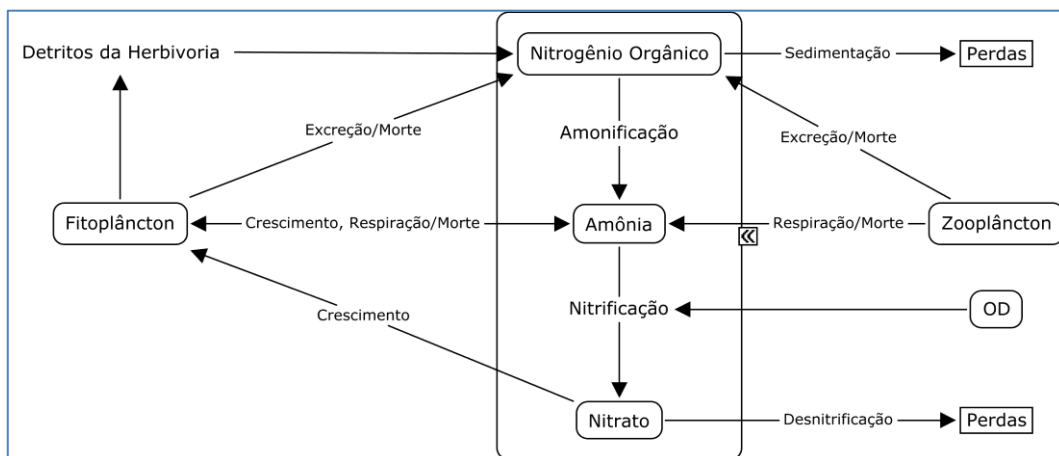
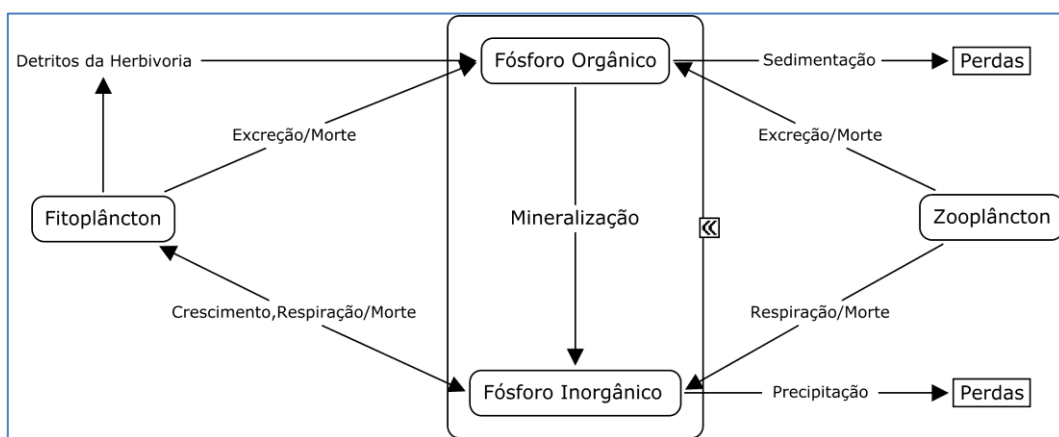


Figura 1: Processos simulados na dinâmica do fitoplâncton.

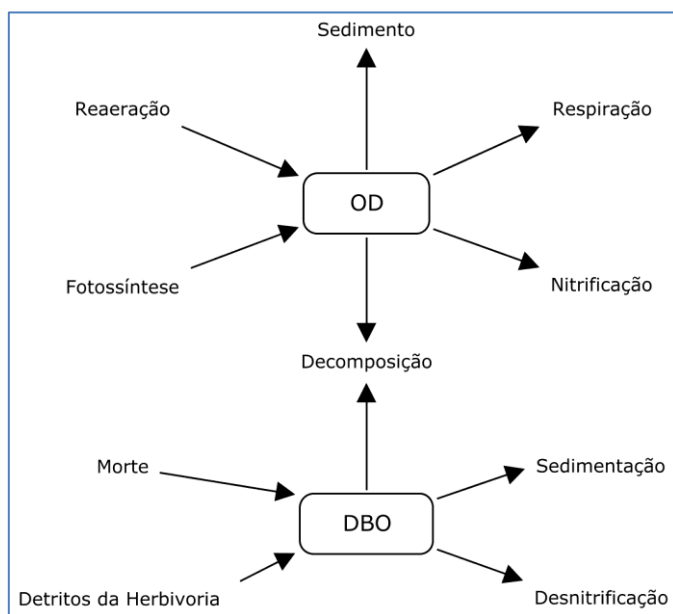




**Figura 2: Processos simulados no ciclo do Nitrogênio.**



**Figura 3: Processos simulados no ciclo do Fósforo.**



**Figura 4: Processos simulados na dinâmica OD-DBO.**

Nas figuras anteriores, os esquemas indicam as interações entre as substâncias envolvidas na modelagem e os processos cinéticos. Pode-se observar que as substâncias são interligadas, criando assim um sistema que precisa ser resolvido de forma acoplada.

Em sua maior parte, estes processos são modelados usando reações com coeficientes calculados de forma experimental em laboratórios ou através de experimentos de campo, adquirindo valores dentro de uma faixa específica. Com isso, há incertezas sobre estes processos de transformações. A calibração do modelo de qualidade de água passa obrigatoriamente pela correta definição destes coeficientes.

O padrão hidrodinâmico usado pelo modelo de qualidade de água é obtido através do modelo hidrodinâmico. Não é possível simular padrões de qualidade de água para um determinado domínio se não for definido, para o cenário estudado, o padrão hidrodinâmico.

A seguir, apresenta-se, primeiramente, a equação com os termos do transporte advectivo e difusivo, a qual é igual para todas as substâncias, e depois as reações cinéticas para cada escalar.

A equação integrada em uma camada de espessura  $H$ , que geralmente vai do fundo à superfície, descrevendo o transporte de um escalar para variáveis de grande escala (Bedford, 1994), usando a técnica de filtragem para a modelagem das tensões turbulentas (mais detalhes em Rosman, 1987 e Aldama, 1985), é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( H \left[ D_{ij} \delta_{jk} + \frac{\Lambda_k^2}{12} \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x_k} \right) - \frac{C}{H} \underbrace{(q_P - q_E \pm q_I)}_{\Sigma q} + \Sigma R_c + I$$

onde  $C$  é a concentração do escalar de interesse,  $U_i$  são as componentes da velocidade na direção  $x_i$  promediadas na direção vertical,  $H$  é a altura da coluna de água,  $D_{ij}$  é o tensor que representa o coeficiente de difusão turbulenta de massa,  $\delta_{jk}$  representa o delta de Kronecker e  $\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k$  é a largura do filtro na dimensão  $x_k$ , sendo  $\alpha_k$  um parâmetro de escala,  $q_P$ ,  $q_E$  e  $q_I$  são valores dados de vazões por unidade de área, e.g.

[m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>], respectivamente, de precipitação, evaporação e infiltração,  $\Sigma R_c$  representa reações cinéticas de produção ou consumo e  $I$  fontes ou sumidouros. As reações cinéticas de produção e consumo  $\Sigma R_c$  pertinentes à qualidade de água são detalhadas a seguir.

Assim como no modelo hidrodinâmico, existem também condições de contorno de terra e de contorno aberto para o modelo de transporte 2DH. Na verdade, todas as condições de contorno relativas à equação de transporte são condições de fluxo, cujo modelo conceitual pode ser expresso nos seguintes termos: “O fluxo advectivo-difusivo na direção normal ao contorno, imediatamente antes do contorno dentro do domínio, é igual ao fluxo normal total imediatamente depois do contorno fora do domínio”. Essa condição de contorno geral pode ser escrita matematicamente como:

$$U_N C - \left( D_N + \frac{\Lambda_N^2}{12} \left| \frac{\partial U_N}{\partial x_N} \right| \right) \frac{\partial C}{\partial x_N} = \frac{F_N^*}{H},$$

onde o índice  $n$  representa a direção normal e  $F_N^*$  é a carga afluyente por metro linear. Geralmente a carga afluyente é definida em kg.dia<sup>-1</sup>, mg.hora<sup>-1</sup> ou similar.

A representação dos fenômenos simulados através de equações matemáticas é mostrada a seguir, sendo descritos os termos de cada equação, assim como os parâmetros utilizados.

#### Clorofila-a (fitoplâncton):

$$\Sigma R_9 = \underset{\text{crescimento}}{k_g C_9} - \underset{\text{respiração e excreção}}{k_{ra} C_9} - \underset{\text{mortalidade}}{k_{ea} C_9} - \underset{\text{herbivoria}}{k_{gz} C_9} - \underset{\text{sedimentação}}{\frac{v_s}{H} C_9}$$

No modelo, o fitoplâncton é simulado como um único grupo, utilizando a Clorofila a como indicador de sua concentração.

O crescimento de algas é uma função da intensidade de luz, disponibilidade de nutrientes e da temperatura. Utilizando a abordagem da multiplicação dos fatores limitantes, a taxa de crescimento é representada por:  $k_g = k_g(T)\phi(I)\phi(n)$  onde  $k_g(T)$  representa a influência da temperatura na taxa de crescimento,  $\phi(I)$  representa o fator limitante relacionado à intensidade de luz e  $\phi(n)$  representa o fator limitante relacionado à concentração de nutrientes. Os fatores limitantes possuem valores entre 0,0 e 1,0, sendo 0,0 para limitação total e 1,0 para nenhuma limitação.

Quando apenas um grupo de algas é simulado, a influência da temperatura na taxa de crescimento pode ser representada adequadamente através de uma formulação exponencial. A formulação utilizada neste modelo é baseada na equação de Arrhenius, com uma temperatura de referência de 20°C:  $k_g(T) = k_{g20} \theta^{(T-20)}$ .

Na expressão,  $k_{g20}$  é a taxa máxima de crescimento a 20°C sob condições ótimas de luz e com excesso de nutrientes e  $\theta$  é o fator de correção da temperatura. Eppley (1972) propôs o valor de  $\theta$  igual a 1,066, baseado em um grande número de experimentos com várias espécies de fitoplâncton.

Para determinar a limitação do crescimento por nutrientes foi utilizada a cinética de Michaelis-Menten, sendo que os efeitos de cada nutriente foram combinados através do mínimo fator limitante. Neste modelo, apenas o Fósforo e o Nitrogênio foram considerados como nutrientes limitantes. Assim, o fator de limitação ao crescimento é representado por:

$$\phi_n = \min\left(\frac{(C_1 + C_2)}{k_{sN} + (C_1 + C_2)}; \frac{C_3}{k_{sP} + C_3}\right),$$

onde  $k_{sN}$  e  $k_{sP}$  são constantes de meia saturação para as concentrações de Fósforo e Nitrogênio inorgânico, respectivamente.

As formulações de limitação do crescimento de algas relacionado à intensidade de luz consistem de dois componentes: um descrevendo a atenuação da luz com a profundidade e outro que define o efeito da intensidade de luz resultante no crescimento

de algas. A atenuação da luz através da coluna de água é definida, neste modelo, pela lei de Beer-Lambert:  $I(z) = I_0 e^{-k_e z}$

Acima,  $I(z)$  é a intensidade de luz na profundidade  $z$ ,  $I_0$  é a intensidade de luz na superfície e  $k_e$  é o coeficiente de extinção da luz.

A intensidade de luz na superfície é uma função do local, época do ano, hora do dia, condições meteorológicas e sombreamento por características topográficas e pela vegetação da região. A intensidade de luz na superfície, usada em formulações de crescimento de algas, corresponde apenas à faixa visível, que tipicamente está em torno de 50% da radiação solar total na superfície utilizada na simulação da temperatura. O coeficiente de extinção da luz  $k_e$  utilizado foi descrito por Riley (1956):  $k_e = k'_e + 0.0088C_0 + 0.054C_0^{2/3}$  onde  $k'_e$  é a parte do coeficiente de extinção da luz devido à absorção por partículas suspensas, com exceção das algas. No modelo, um valor constante para  $k'_e$  é adotado, sendo  $0,3 \text{ m}^{-1}$  um valor típico para reservatórios.

O efeito da intensidade de luz resultante no crescimento de algas é representado através da equação de Steele (1965), que considera os efeitos da fotoinibição:

$$\phi(I) = \frac{I}{I_s} \exp\left(1 - \frac{I}{I_s}\right),$$

onde  $I_s$  a intensidade ótima de luz. Como a intensidade de luz é atenuada com a profundidade, a equação deve ser integrada ao longo da profundidade, com a substituição de  $I$  pela equação (17). Quando a radiação solar na superfície é utilizada como uma média diária, o fator  $\phi(I)$  é multiplicado pelo fotoperíodo - expresso como a fração do dia com luz solar, para representar as horas ensolaradas do dia. Assim, a formulação de Steele, 1965, para limitação do crescimento pela luz, integrada na profundidade e no tempo, é expressa por:

$$\phi(I) = \frac{2.718 f_p}{k_e H} \left[ \exp\left(-\frac{I_0}{I_s} e^{-k_e H}\right) - \exp\left(-\frac{I_0}{I_s}\right) \right],$$

onde  $f_p$  é o fotoperíodo e  $H$  é a espessura da camada de água. Quando valores instantâneos são utilizados para a radiação na superfície, o valor do fotoperíodo não é considerado.

O modelo completo utilizado para a taxa de crescimento do fitoplâncton, com as considerações citadas acima, pode ser descrito como:

$$k_g = k_{g20} \theta^{(T-20^\circ)} \frac{2.718 f_p}{k_e H} \left[ \exp\left(-\frac{I_o}{I_s} e^{-k_e H}\right) - \exp\left(-\frac{I_o}{I_s}\right) \right] \times \min\left(\frac{(C_1 + C_2)}{k_{sN} + (C_1 + C_2)}; \frac{C_3}{k_{sP} + C_3}\right)$$

A respiração e a excreção de algas foram combinadas como um único termo  $k_{ra}$  que inclui todas as perdas por processos metabólicos e de excreção. Estas perdas representam a diferença entre o crescimento bruto e o crescimento líquido. Além de representarem perdas da concentração de algas, a respiração e a excreção são componentes importantes da reciclagem de nutrientes. Neste modelo, o termo  $k_{ra}$  foi descrito como uma função da temperatura através da equação de Arrhenius, com uma temperatura de referência de 20°C:  $k_{ra} = k_{ra20} \theta_{ra}^{(T-20^\circ)}$ , sendo  $k_{ra20}$  a taxa de perdas de fitoplâncton por respiração e excreção a 20°C e  $\theta_{ra}$  o fator de correção da temperatura.

A mortalidade não predatória se refere às “perdas” de algas que não são causadas pela herbivoria ou por outros processos de perda, como sedimentação, respiração e excreção. Na mortalidade não predatória estão incluídos os processos de senescência, parasitismo, e mortalidade induzida pelo estresse devido a deficiências severas nos nutrientes, condições ambientais extremas e substâncias tóxicas. Neste modelo, a taxa de mortalidade não predatória é especificada pelo usuário como um coeficiente constante.

Neste modelo, o zooplâncton herbívoro pode ser simulado para representar de maneira mais realista o processo de herbivoria, com o objetivo de obter uma melhor simulação da dinâmica do fitoplâncton. As equações acopladas do fitoplâncton e zooplâncton fornecem as principais características para simular as interações predador-presa, já que a taxa de herbivoria é definida como função da densidade de zooplâncton

que, por sua vez, varia dinamicamente com a concentração de fitoplâncton. A taxa de herbivoria foi representada por:

$$k_{gz} = \left( \frac{C_9}{k_{sa} + C_9} \right) k_{gz20} C_4 \theta_{gz}^{(T-20)}$$

onde  $k_{gz20}$  é a taxa de predação na temperatura de 20°C,  $\theta_{gz}$  é o fator de correção da temperatura e  $k_{sa}$  é a constante de meia saturação para herbivoria.

A taxa de sedimentação do fitoplâncton depende da sua densidade, tamanho, forma e estado fisiológico das suas células, da viscosidade e densidade da água, e da turbulência e padrão de circulação hidrodinâmico. Além disso, outros fatores dificultam a representação da sedimentação do fitoplâncton, como a formação de vacúolos de gás e de bainhas gelatinosas, que tornam algumas espécies flutuantes. Devido a estas dificuldades, o valor da velocidade de sedimentação  $v_s$  utilizado neste modelo é constante, sendo considerado como um parâmetro de calibração.

### Zooplâncton Herbívoro

$$\Sigma R_4 = \underbrace{r_{ca} E_z k_{gz} C_9 C_4}_{\text{crescimento}} - \underbrace{k_{rz} C_4}_{\text{respiração e excreção}} - \underbrace{k_{ez} C_4}_{\text{mortalidade}} - \underbrace{k_{gzc} C_4}_{\text{predação}}$$

A dinâmica do zooplâncton é governada pelos mesmos processos gerais que regem a dinâmica do fitoplâncton: crescimento, respiração e excreção, predação e mortalidade não predatória. A maior diferença é que o zooplâncton não está sujeito aos processos de sedimentação, uma vez que estes organismos possuem movimentação própria e migram verticalmente na coluna de água.

Na formulação do crescimento do zooplâncton, a taxa de herbivoria  $k_{gz}$ , mostrada anteriormente, foi multiplicada por outros dois coeficientes. O coeficiente  $r_{ca}$  representa a razão carbono/Clorofila nas células das algas, podendo variar entre 10 e 100 mgC (mg/L) (BOWIE et al., 1985). Esta razão é uma constante especificada pelo usuário. O segundo coeficiente acrescentado à formulação do crescimento ( $E_z$ ) é o fator de

eficiência de herbivoria. O valor da eficiência varia entre 0,0 e 1,0. O valor 0,0 indica nenhuma assimilação e 1,0 indica assimilação total. Assim, o fator de eficiência define o quanto da biomassa de alga se torna biomassa de zooplâncton e o quanto é liberado como detrito.

A respiração e a excreção de zooplâncton são representadas de maneira similar à do fitoplâncton através da equação de Arrhenius, com uma temperatura de referência de 20°C:  $k_{rz} = k_{rz20} \theta_{rz}^{(T-20^\circ)}$ , sendo  $k_{rz20}$  a taxa de perdas de zooplâncton por respiração e excreção a 20°C e  $\theta_{rz}$  o fator de correção da temperatura. A mortalidade do zooplâncton também é definida da mesma maneira que a do fitoplâncton, sendo especificada como um coeficiente constante.

Como neste modelo o zooplâncton herbívoro foi o último nível trófico considerado, a dinâmica entre o zooplâncton e níveis tróficos superiores não pode ser simulada. Portanto, a predação por peixes e zooplâncton carnívoro pode ser representada através de uma taxa de predação  $k_{gzc}$  constante, ajustada em função da temperatura:  $k_{gzc} = k_{gzc20} \theta_{gzc}^{(T-20^\circ)}$ , na qual  $k_{gzc20}$  é a taxa de predação do zooplâncton a 20°C e  $\theta_{gzc}$  é o fator de correção da temperatura.

### Nitrogênio Orgânico

$$\begin{aligned} \Sigma R_7 = & - \underbrace{k_{71} C_7}_{\text{amonificação}} - \underbrace{\frac{v_{s3}(1-f_7)}{H} C_7}_{\text{sedimentação}} + \underbrace{r_{na}(1-E_z)k_{gz} C_9 C_4}_{\text{detritos da herbivoria}} + \underbrace{r_{na} k_{ra} f_{on} C_9}_{\text{excr. de fitoplâncton}} \\ & + \underbrace{(r_{na}/r_{ca})k_{rz} f_{on} C_4}_{\text{excr. de zooplâncton}} + \underbrace{r_{na} k_{ea} f_{on} C_9}_{\text{morte de fitoplâncton}} + \underbrace{(r_{na}/r_{ca})k_{ez} f_{on} C_4}_{\text{morte de zooplâncton}} \end{aligned}$$

### Amônia ou Nitrogênio Amoniacal



$$\begin{aligned} \Sigma R_1 = & \underbrace{r_{na} k_{ra} (1 - f_{on}) C_9}_{\text{resp. de fitoplâncton}} + \underbrace{\frac{r_{na}}{r_{ca}} k_{rz} (1 - f_{on}) C_4}_{\text{resp. de zooplâncton}} + \underbrace{r_{na} k_{ea} (1 - f_{on}) C_9}_{\text{morte de fitoplâncton}} + \\ & \underbrace{\left( \frac{r_{na}}{r_{ca}} \right) k_{ez} (1 - f_{on}) C_4}_{\text{morte de zooplâncton}} - \underbrace{\frac{C_1}{(k_{am} + C_1)} r_{na} f_{uN} k_g C_9}_{\text{crescimento de fitoplâncton}} + \underbrace{k_{71} C_7}_{\text{amonificação}} - \underbrace{k_{12} C_1}_{\text{nitrificação}} \end{aligned}$$

### Nitrato

$$\Sigma R_2 = \underbrace{k_{12} C_1}_{\text{nitrificação}} - \underbrace{k_{2D} C_2}_{\text{desnitrificação}} - \underbrace{\left( 1 - \frac{C_1}{(k_{am} + C_1)} \right) r_{na} f_{uN} k_g C_9}_{\text{crescimento de fitoplâncton}}$$

Neste modelo, o Nitrogênio Orgânico particulado e o dissolvido foram combinados em um único compartimento indisponível para o crescimento de algas (Nitrogênio Orgânico total). Outra consideração é que, no processo de nitrificação, a oxidação da Amônia para Nitrato ocorre diretamente, considerando que a transformação de nitrito para Nitrato é mais rápida que a transformação de Amônia para nitrito. Assim, a concentração de nitrito não é considerada.

Amonificação é a formação de Amônia durante o processo de decomposição, tanto anaeróbia como aeróbia, da parte nitrogenada da matéria orgânica dissolvida ou particulada. A taxa de amonificação varia no modelo de acordo com a temperatura, sendo representada através da equação de Arrhenius com uma temperatura de referência de 20°C:  $k_{71} = k_{71(20)} \theta_{71}^{(T-20^\circ)}$ , onde  $k_{71(20)}$  é a taxa de amonificação a 20°C e  $\theta_{71}$  é o fator de correção da temperatura.

A parte particulada do Nitrogênio Orgânico, dada pelo resultado da subtração  $(1 - f_7)$ , sedimenta através da velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas ( $v_{s3}$ ) dividida pela profundidade. Os valores de  $f_7$  e  $v_{s3}$  são constantes, sendo especificados pelo usuário.

A biomassa do fitoplâncton que não é consumida pelo zooplâncton se torna detrito, liberando Nitrogênio Orgânico particulado. A quantidade de Nitrogênio liberado

depende da razão Nitrogênio/Clorofila no fitoplâncton ( $r_{na}$ ). Neste modelo, a razão Nitrogênio/Clorofila ( $r_{na}$ ) foi considerada como sendo variável, sendo representada pela seguinte equação:

$$r_{na} = r_{namin} + (r_{namax} - r_{namin}) \left( \frac{(C_1 + C_2)}{k_{SN} + (C_1 + C_2)} \right),$$

onde  $r_{namin}$  e  $r_{namax}$  são as razões Nitrogênio/Clorofila mínima e máxima no fitoplâncton, respectivamente, e  $k_{SN}$  é a constante de meia saturação para a concentração de Nitrogênio inorgânico. Assim, quando não há limitação do crescimento de fitoplâncton por Nitrogênio, a razão Nitrogênio/Clorofila assume o valor máximo, e quando a limitação é completa a razão Nitrogênio/Clorofila assume o valor mínimo.

A liberação de nutrientes pelo fitoplâncton e pelo zooplâncton através da respiração e excreção é um dos principais componentes da reciclagem de nutrientes, sendo representada como o produto da taxa de respiração e excreção pela estequiometria relacionada ao nutriente no organismo. A porcentagem de nutrientes no zooplâncton foi assumida como sendo igual à do fitoplâncton.

Apesar da respiração e excreção serem simuladas como um único processo na dinâmica do fitoplâncton e do zooplâncton, na dinâmica de nutrientes estes processos são divididos. Assim, a parte de nutrientes liberados pela respiração é transformada em nutrientes inorgânicos, enquanto que a parte liberada pela excreção é transformada em nutrientes orgânicos. No caso do ciclo do Nitrogênio, esta divisão é realizada através da utilização do parâmetro  $f_{on}$ , especificado pelo usuário, sendo que Amônia é liberada pela respiração e Nitrogênio Orgânico é liberado pela excreção.

A liberação de nutrientes na coluna de água através da morte não predatória de fitoplâncton e de zooplâncton foi representada da mesma forma que a respiração e excreção, sendo que uma parte do Nitrogênio nas células é transformada em Amônia e a outra parte em Nitrogênio Orgânico.

O crescimento de algas é resultado da utilização e conversão de nutrientes inorgânicos em material orgânico através do mecanismo da fotossíntese. O Nitrato e a

Amônia são as formas assimiláveis de Nitrogênio consideradas no modelo. Para simular a preferência das algas por Amônia, foi utilizada a cinética de Michaelis-Menten, com uma constante de meia saturação  $k_{am}$  especificada pelo usuário.

A taxa de consumo de nutrientes para o crescimento de algas aumenta com a concentração externa, mas ao mesmo tempo diminui com a concentração interna de nutrientes nas algas, se aproximando do seu valor de saturação. Este efeito foi representado pela seguinte formulação:

$$f_{uN} = \left( \frac{r_{namax} - r_{na}}{r_{namax} - r_{namin}} \right) \left( \frac{(C_1 + C_2)}{k_{uN} + (C_1 + C_2)} \right),$$

onde  $k_{uN}$  é a constante de meia saturação para o consumo de Nitrogênio,  $r_{namin}$  e  $r_{namax}$  são as razões Nitrogênio/Clorofila mínima e máxima no fitoplâncton, respectivamente. Assim, o consumo de Nitrogênio se aproxima de zero quando a concentração externa de Nitrogênio está esgotada ou quando a concentração interna atinge o valor de saturação máximo.

A oxidação de Amônia para Nitrato é denominada de nitrificação, ocorrendo predominantemente em ambiente aeróbio. Para considerar os efeitos da temperatura e da concentração de oxigênio na taxa de nitrificação, foram utilizadas as formulações de Arrhenius e de Michaelis-Menten:

$$k_{12} = k_{12(20)} \theta_{12}^{(T-20^\circ)} \left( \frac{C_6}{k_{nit} + C_6} \right),$$

sendo  $k_{12(20)}$  a taxa de nitrificação a 20°C,  $\theta_{12}$  o fator de correção da temperatura e  $k_{nit}$  a constante de meia saturação.

A desnitrificação é a redução do Nitrato a Nitrogênio molecular, sendo realizada por bactérias anaeróbias facultativas, predominantemente em meio anaeróbio. Esta reação resulta na perda de Nitrogênio para a atmosfera, uma vez que o Nitrogênio molecular está na forma gasosa. A formulação de Arrhenius foi utilizada para considerar

os efeitos da temperatura na taxa de desnitrificação:  $k_{2D} = k_{2D20} \theta_{2D}^{(T-20^\circ)}$ , onde  $k_{2D20}$  é a taxa de nitrificação a 20°C e  $\theta_{2D}$  é o fator de correção da temperatura.

### Fósforo Orgânico

$$\begin{aligned} \Sigma R_8 = & \underbrace{r_{pa} k_{ra} f_{op} C_9}_{\text{excr. de algas}} + \underbrace{\left( r_{pa} / r_{ca} \right) k_{rz} f_{op} C_4}_{\text{excr. de zooplâncton}} + \underbrace{r_{pa} k_{ea} f_{op} C_9}_{\text{morte de algas}} + \underbrace{\left( r_{pa} / r_{ca} \right) k_{ez} f_{op} C_4}_{\text{morte de zooplâncton}} \\ & + \underbrace{r_{pa} (1 - E_z) k_{gz} C_9 C_4}_{\text{detritos da herbivoria}} - \underbrace{k_{83} C_8}_{\text{mineralização}} - \underbrace{\frac{v_{s3} (1 - f_{D8})}{H} C_8}_{\text{sedimentação}} \end{aligned}$$

### Fósforo Inorgânico

$$\begin{aligned} \Sigma R_3 = & \underbrace{r_{pa} k_{ra} (1 - f_{op}) C_9}_{\text{resp. de fitoplâncton}} + \underbrace{\left( r_{pa} / r_{ca} \right) k_{rz} (1 - f_{op}) C_4}_{\text{resp. de zooplâncton}} + \underbrace{r_{pa} k_{ea} (1 - f_{op}) C_9}_{\text{morte de fitoplâncton}} \\ & + \underbrace{\left( r_{pa} / r_{ca} \right) k_{ez} (1 - f_{op}) C_4}_{\text{morte de zooplâncton}} - \underbrace{r_{pa} f_{up} k_g C_9}_{\text{crescim. de fitoplâncton}} + \underbrace{k_{83} C_8}_{\text{mineralização}} - \underbrace{\frac{v_{fr}}{H} C_3}_{\text{precipitação}} \end{aligned}$$

A variável Fósforo inorgânico utilizada no modelo de qualidade da água e eutrofização do SisBaHiA<sup>®</sup> se refere ao fosfato inorgânico dissolvido ou fosfato reativo, que está disponível para o crescimento de algas, enquanto a variável Fósforo orgânico é composta por fosfato particulado e fosfato orgânico dissolvido, representando um compartimento que não está disponível para o crescimento de algas. A biomassa do fitoplâncton que não é consumida pelo zooplâncton se torna detrito, liberando Fósforo inorgânico. A quantidade de Fósforo liberado depende da razão Fósforo/Clorofila no fitoplâncton ( $r_{pa}$ ). Neste modelo, a razão Fósforo/Clorofila é variável, sendo representada pela seguinte equação:

$$r_{pa} = r_{pamin} + (r_{pamax} - r_{pamin}) \left( \frac{C_3}{k_{sp} + C_3} \right),$$

onde  $r_{pamin}$  e  $r_{pamax}$  são as razões Fósforo/Clorofila mínima e máxima no fitoplâncton, respectivamente, e  $k_{sp}$  é a constante de meia saturação para a concentração de Fósforo inorgânico. Assim, quando não há limitação do crescimento de fitoplâncton por Fósforo, a razão Fósforo/Clorofila assume o valor máximo, e quando a limitação é completa, a razão Fósforo/Clorofila assume o valor mínimo.

Assim como no ciclo do Nitrogênio, a liberação de Fósforo por respiração e excreção de fitoplâncton e de zooplâncton foi representada como o produto da sua taxa pela estequiometria relacionada ao Fósforo no organismo. No ciclo do Fósforo, a parte de nutrientes liberados pela respiração é transformada em Fósforo inorgânico, enquanto que a parte liberada pela excreção é transformada em Fósforo orgânico. Esta divisão é realizada através da utilização do parâmetro  $f_{op}$ , especificado pelo usuário.

A liberação de Fósforo na coluna de água através da morte não predatória de fitoplâncton e de zooplâncton foi representada da mesma forma que a respiração e excreção, sendo que uma parte do Fósforo no interior das células é liberada sob a forma de Fósforo inorgânico e a outra parte sob a forma de Fósforo orgânico.

O Fósforo Inorgânico é a única forma de Fósforo assimilável pelo fitoplâncton considerada no modelo. Como citado anteriormente para o ciclo do Nitrogênio, neste modelo a taxa de consumo de nutrientes para o crescimento de algas aumenta com a concentração externa, mas ao mesmo tempo diminui com a concentração interna de nutrientes nas algas se aproximando do seu valor de saturação. Este efeito foi representado no consumo de Fósforo inorgânico através da seguinte formulação:

$$f_{uP} = \left( \frac{r_{pamax} - r_{pa}}{r_{pamax} - r_{pamin}} \right) \left( \frac{C_3}{k_{uP} + C_3} \right),$$

onde  $k_{uP}$  é a constante de meia saturação para o consumo de Fósforo inorgânico,  $r_{pamin}$  e  $r_{pamax}$  são as razões Fósforo/Clorofila mínima e máxima no fitoplâncton,

respectivamente. Assim, o consumo de Fósforo se aproxima de zero quando a concentração externa de Fósforo está esgotada ou quando a concentração interna atinge o valor de saturação máximo. O Fósforo orgânico é decomposto em Fósforo inorgânico através da ação de microrganismos. Este processo foi representado considerando os efeitos da temperatura, através da equação de Arrhenius:  $k_{83} = k_{83(20)}\theta_{83}^{(T-20^\circ)}$ , sendo  $k_{83(20)}$  a taxa de mineralização a 20°C e  $\theta_{83}$  o fator de correção da temperatura. A parte particulada do Fósforo orgânico, dada pelo resultado da subtração  $(1-f_{D8})$ , sedimenta através da velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas ( $v_{s3}$ ) dividida pela espessura da camada de água. Os valores de  $f_{D8}$  e  $v_{s3}$  são constantes, sendo especificados pelo usuário. Vários fatores físicos, químicos e físico-químicos interferem na precipitação (imobilização) dos íons fosfato, reduzindo sua concentração na água. Para representar este processo, um termo similar ao da sedimentação foi acrescentado à equação do Fósforo inorgânico, representando uma perda para o sedimento.

### OD: Oxigênio Dissolvido

$$\begin{aligned} \Sigma R_6 = & \underbrace{k_a(O_s - C_6)}_{\text{reaeração}} - \underbrace{k_D C_5}_{\text{decomp.}} - \underbrace{r_{on} k_{12} C_1}_{\text{nitrificação}} + \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_g C_9}_{\text{fotossíntese}} - \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_{ra} C_9}_{\text{respiração de fitoplâncton}} \\ & - \underbrace{r_{oc} k_{rz} C_4}_{\text{respiração de zooplâncton}} - \frac{SOD}{H}_{\text{sedimento}} \end{aligned}$$

### DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

$$\begin{aligned} \Sigma R_5 = & - \underbrace{k_D C_5}_{\text{decomp.}} - \underbrace{\frac{v_{s3}(1-f_{D5})}{H} C_5}_{\text{sedimentação}} + \underbrace{r_{oc} r_{ca} (1-E_z) k_{gz} C_9}_{\text{detritos da herbivoria}} \\ & + \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_{ea} C_9}_{\text{morte de fitoplâncton}} + \underbrace{r_{oc} k_{ez} C_4}_{\text{morte de zooplâncton}} \end{aligned}$$

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) pode ser dividida em duas partes: DBO carbonácea: demanda de Oxigênio Dissolvido para decompor a matéria orgânica e DBO nitrogenada: demanda de Oxigênio Dissolvido devido à nitrificação.

Neste modelo, a DBO é representada apenas pela parte carbonácea, sendo que os efeitos da nitrificação são representados diretamente na equação do Oxigênio Dissolvido.

Diversos fatores influem na taxa de decomposição da matéria orgânica. Neste modelo, é considerada a influência da temperatura e da concentração de Oxigênio Dissolvido. Este efeito é representado através das equações de Arrhenius e de Michaelis-Menten:

$$k_d = k_{d20} \theta_d^{(T-20^\circ)} \left( \frac{C_6}{k_{DBO} + C_6} \right),$$

Na expressão acima,  $k_{d20}$  é a taxa de decomposição a 20°C,  $\theta_d$  é o fator de correção da temperatura e  $k_{DBO}$  é a constante de meia saturação para o consumo de oxigênio.

A taxa de dissolução do oxigênio na água é proporcional à diferença entre a concentração de saturação e a atual concentração de Oxigênio Dissolvido.

Existem diversas formulações para a taxa de reaeração em rios, estuários e lagos. A formulação de Wanninkhof para reservatórios é descrita por:

$$k_a = \frac{k_l}{H} \quad ; \quad k_l = 0.0986 W_{10}^{1.64},$$

sendo  $k_l$  o coeficiente de transferência de oxigênio na superfície e  $W_{10}$  a velocidade do vento medida 10 m acima da superfície. O usuário também pode escolher um valor constante para a taxa de reaeração. Neste caso,  $k_a$  será ajustado pela temperatura:

$k_a = k_{a20} \theta_a^{T-20^\circ}$ , onde  $k_{a(20)}$  é taxa de reaeração na temperatura de 20°C e  $\theta_a$  é o fator de correção da temperatura para a reaeração.

A concentração de saturação de oxigênio no modelo depende da temperatura, salinidade e pressão parcial devida à altitude. As formulações utilizadas para representar a concentração de saturação são:

Concentração de saturação do Oxigênio Dissolvido em (mg/L):

$$OD_{\text{sat}} = \exp \left\{ -139.34411 + \frac{(157570.1)}{T_a} - \frac{(66423080)}{T_a^2} + \frac{(1.2438 \times 10^{10})}{T_a^3} - \frac{(8.621949 \times 10^{11})}{T_a^4} - S \left( 0.017674 - \frac{10.7454}{T_a} + \frac{2140.7}{T_a^2} \right) \right\} - 0.1148 Z_{\text{mar}}$$

onde  $T_a$  é a temperatura absoluta da água em graus Kelvin,  $S$  é a salinidade e  $Z_{\text{mar}}$  é a cota acima do nível do mar em km. O oxigênio consumido nas duas etapas da nitrificação pode ser calculado da seguinte forma:

$$r_{oa} = 3.428571 \text{g(OD)/g(NH}_3 \Rightarrow \text{NO}_2),$$

$$r_{oi} = 1.142857 \text{g(OD)/g(NO}_2 \Rightarrow \text{NO}_3),$$

onde  $r_{oa}$  e  $r_{oi}$  representam a quantidade de Oxigênio Dissolvido consumida para a oxidação de Amônia a nitrito e para a oxidação de nitrito a Nitrato, respectivamente. O consumo de oxigênio durante todo o processo pode ser representado como:

$$r_{on} = r_{oa} + r_{oi} = 4.571428 \text{g(OD)/g(NH}_3 \Rightarrow \text{NO}_3),$$

sendo então  $r_{on}$  a quantidade de Oxigênio Dissolvido consumido por unidade de massa de Nitrogênio oxidado no processo total de nitrificação ou de oxidação de Amônia para Nitrato.



A quantidade de oxigênio produzida por quantidade de carbono orgânico criado através da fotossíntese é dada por:

$$r_{oc} = 2,6667 \text{ g(OD)/g(C)}$$

Como o fitoplâncton está representado no modelo através de Clorofila *a*, este valor é multiplicado pela razão carbono/Clorofila *a* nas células das algas. A produção de oxigênio através da fotossíntese varia de acordo com a taxa de crescimento e a concentração de fitoplâncton.

Na respiração, que é o processo oposto ao da fotossíntese, o oxigênio é consumido e o dióxido de carbono é liberado. A razão  $r_{oc}$  agora significa a quantidade de oxigênio consumido na decomposição de um grama de carbono orgânico. Neste modelo, é considerada a respiração de fitoplâncton e zooplâncton, que depende da taxa de respiração e da concentração de cada organismo. A parte do fitoplâncton que não foi consumida pelo zooplâncton durante o processo de herbivoria é transformada em DBO. Os detritos são transformados em DBO através da multiplicação das razões  $r_{oc}$  e  $r_{ca}$  pela concentração de fitoplâncton dada em Clorofila-*a*. As perdas de fitoplâncton e zooplâncton através da mortalidade não predatória são transformadas em DBO seguindo a mesma abordagem utilizada para os detritos da herbivoria. Assim como os nutrientes orgânicos, a parte particulada da matéria orgânica ( $1-f_{D5}$ ), sedimenta com a velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas ( $v_{s3}$ ) dividida pela profundidade. Os valores de  $f_{D5}$  e  $v_{s3}$  são constantes, sendo especificados pelo usuário. A decomposição da matéria orgânica presente nos sedimentos pode representar uma parte significativa do consumo de oxigênio no corpo de água. A demanda de oxigênio no sedimento representada no modelo depende da temperatura, sendo expressa por:

$$SOD = SOD_{20} \theta_s^{(T-20^\circ)}$$

, sendo  $SOD_{20}$  a demanda de oxigênio no sedimento na temperatura de 20°C e  $\theta_s$  o fator de correção da temperatura.

A Tabela 3 lista as variáveis, taxas e coeficientes adotados nas reações cinéticas e apresenta os valores usuais. Estes são coeficientes tipicamente encontrados na literatura especializada, assim os resultados obtidos devem ser interpretados de forma

cuidadosa – o modelo pode ser usado para avaliar, de forma qualitativa, diferentes cenários, podendo ser usado como uma ferramenta importante para a tomada de decisão.

Tabela 3: Lista de parâmetros e coeficientes usados no SisBaHiA®, com valores usuais.

Símbolo	Parâmetro / Coeficiente	Faixa de Valores	Valores usuais	Unidades	Referência
$E_z$	Eficiência de predação do zooplâncton sobre algas	0.4 a 0.8	<b>0.6</b>	-	Chapra (1997)
$f_{D5}$	Fração de DBO dissolvido na coluna de água	0.1 a 0.9	<b>0.5</b>	-	Wool et al. (2002)
$f_{D7}$	Fração de Nitrogênio Orgânico dissolvido na coluna de água	0.1 a 1.0	<b>1.0</b>	-	Wool et al. (2002)
$f_{D8}$	Fração de Fósforo orgânico dissolvido na coluna de água.	0.1 a 1.0	<b>0.85</b>	-	Wool et al. (2002)
$f_{on}$	Fração de morte e respiração do fitoplâncton reciclada para Nitrogênio Orgânico	...	<b>0.5</b>	-	Wool et al. (2002)
$f_{op}$	Fração de morte e respiração da fitoplâncton reciclada para Fósforo orgânico	0.1 a 0.9	<b>0.5</b>	-	Wool et al. (2002)
$I_s$	Nível ótimo de luz	200 a 350	<b>250 a 300</b>	ly/d	Bowie et al. (1985)
$k_{12(20)}$	Coeficiente de nitrificação em 20°C	0.03 a 0.9	<b>0.1 a 0.5</b>	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{71(20)}$	Coeficiente de amonificação em 20°C	0.001 a 0.2	<b>0.03</b>	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{83(20)}$	Coeficiente de mineralização do Fósforo orgânico em 20°C	0.001 a 0.8	0.03	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{a20}$	Coeficiente de reaeração em 20°C	0.1 a 5.0	0.5	d <sup>-1</sup>	Wool et al. (2002)
$K_{am}$	Constante de meia saturação para preferência de Amônia	...	50	µg N/L	Chapra (1997)
$K_{2D20}$	Coeficiente de desnitrificação em 20°C	0 a 1.0	0.1	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)

Símbolo	Parâmetro / Coeficiente	Faixa de Valores	Valores usuais	Unidades	Referência
$k_{D20}$	Coeficiente de desoxigenação em 20°C	0.01 a 1.5	0.2	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{DBO}$	Constante de meia saturação para oxidação da DBO		0.5	mg O <sub>2</sub> /L	Bowie et al. (1985)
$k_{ea}$	Taxa de mortalidade do fitoplâncton	0.003 a 0.17	0.01 a 0.1	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{ez}$	Taxa de mortalidade do zooplâncton	0.001 a 0.125	0.005 a 0.02	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{g20}$	Taxa de crescimento do fitoplâncton a 20°C	0.2 a 8.0	2.0	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{gz20}$	Taxa de predação do fitoplâncton pelo zooplâncton a 20°C	0.5 a 5.0	1.0 a 2.0	m <sup>3</sup> g C/d	Chapra (1997)
$k_{gzc20}$	Perdas do zooplâncton por predação	0.001 a 0.1	0.01 a 0.05	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{NIT}$	Constante de meia saturação da nitrificação por limitação de oxigênio	0.5 a 2.0	0.5	mg O <sub>2</sub> /L	Bowie et al. (1985)
$k_{NO3}$	Constante de meia saturação da desnitrificação por limitação de oxigênio		0.1	mg O <sub>2</sub> /L	Bowie et al. (1985)
$k_{ra20}$	Perdas de fitoplâncton por respiração e excreção a 20°C	0.005 a 0.8	0.05 a 0.2	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{rz20}$	Perdas do zooplâncton por respiração e excreção a 20°C	0.001 –0.36	0.01 a 0.05	d <sup>-1</sup>	Bowie et al. (1985)
$k_{sa}$	Constante de meia saturação para predação de zooplâncton sobre alga	2 a 25	5 a 15	µg Chla/L	Chapra (1997)
$k_{sN}$	Constante de meia saturação de N	1.4 a 400	25 a 200	µg N/L	Bowie et al. (1985)
$k_{sP}$	Constante de meia saturação de P	0.5 a 80.0	20 a 50	µg P/L	Bowie et al. (1985)
$k_{uN}$	Constante de meia saturação para o consumo de N	0.0014 a 0.2000		mg N/L	Bowie et al. (1985)
$k_{uP}$	Constante de meia saturação para o consumo de P	0.0028 a 0.0700		mg P/L	Bowie et al. (1985)

Símbolo	Parâmetro / Coeficiente	Faixa de Valores	Valores usuais	Unidades	Referência
$r_{ca}$	Razão carbono/Clorofila nas células das algas	10 a 100	50	g C/g Chla	Bowie et al. (1985)
$r_{nmax}$	Razão Nitrogênio/Clorofila máxima nas células das algas	8.0 a 15.0		mg N/mg Chla	Schladow & Hamilton (1997)
$r_{nmin}$	Razão Nitrogênio/Clorofila mínima nas células das algas	1.5 a 4.0		mg N/mg Chla	Schladow & Hamilton (1997)
$r_{pmax}$	Razão Fósforo/Clorofila máxima nas células das algas	1.0 a 10.9		mg P/mg Chla	Schladow & Hamilton (1997)
$r_{pmin}$	Razão Fósforo/Clorofila mínima nas células das algas	0.1 a 1.0		mg P/mg Chla	Schladow & Hamilton (1997)
$SOD_{20}$	Demanda de oxigênio no sedimento em 20°C	0.2 a 4.0	1.0	g/m/d	Wool et al. (2002)
$V_{fr}$	Velocidade de precipitação do Fósforo inorgânico	...	...	m/d	
$V_{s3}$	Velocidade de deposição de substância orgânica	0.2 a 2.3	1.0	m/d	Chapra (1997)
$V_{s4}$	Velocidade de sedimentação da biomassa	0 a 30.0	0.05 a 2.0	m/d	Bowie et al. (1985)
$\theta_{12}$	Coeficiente de temperatura para a nitrificação	1.02 a 1.08	1.08	-	Bowie et al. (1985)
$\theta_{2D}$	Coeficiente de temperatura para desnitrificação	1.02 a 1.09	1.045	-	Bowie et al. (1985)
$\theta_{71}$	Coeficiente de temperatura para a amonificação	1.02 a 1.09	1.08	-	Bowie et al. (1985)
$\theta_{83}$	Coeficiente de temperatura para a mineralização do Fósforo orgânico	1.02 a 1.09	1.08	-	Bowie et al. (1985)
$\theta_a$	Coeficiente de temperatura para a reaeração	1.008 a 1.047	1.024	-	Bowie et al. (1985)
$\theta_D$	Coeficiente de temperatura para a desoxigenação	1.02 a 1.15	1.047	-	Bowie et al. (1985)

Símbolo	Parâmetro / Coeficiente	Faixa de Valores	Valores usuais	Unidades	Referência
$\theta_g$	Fator de correção da temperatura para o crescimento de fitoplâncton	1.01 a 1.2	1.066	-	Bowie et al. (1985)
$\theta_{gz}$	Fator de correção da temperatura para predação de fitoplâncton por zooplâncton	...	1.08	-	Chapra (1997)
$\theta_{gzc}$	Fator de correção da temperatura para perdas do zooplâncton por predação	...	1.08	-	Chapra (1997)
$\theta_{ra}$	Fator de correção da temperatura para perdas de fitoplâncton por respiração e excreção	...	1.08	-	Chapra (1997)
$\theta_{rz}$	Fator de correção da temperatura para perdas do zooplâncton por respiração e excreção	...	1.08	-	Chapra (1997)
$\theta_s$	Coeficiente de temperatura para a demanda de oxigênio no sedimento	...	1.08	-	Wool et al. (2002)

## 2.2. Delft3D®

Os modelos utilizados no desenvolvimento das simulações da hidrodinâmica e da qualidade da água do Reservatório Intermediário fazem parte do Delft3D®, desenvolvido pelo instituto holandês Deltares. O pacote Delft3D® é composto por diversos módulos e cada módulo tem focos distintos de simulação: hidrodinâmica (FLOW), ondas (SWAN ou WAVE), transporte de sedimentos (SED), qualidade da água (WAQ), mudanças morfológicas (MOR) e processos ecológicos (ECO). Recentemente, o módulo FLOW e os módulos SED, MOR e WAQ tiveram seu código-fonte liberado (DELFT3D®, 2013). Todos os módulos possuem ferramentas de pré-processamento (RGFGRID – gerador de grade e QUICKIN – gerador de batimetria), processamento e pós-processamento (QUICKPLOT), o que facilita o trabalho de implementação, simulação e análise de resultados.

Os módulos utilizados nas simulações deste trabalho foram o FLOW (DELFT3D-FLOW, 2014) e o WAQ (DELFT3D-WAQ, 2014). O modelo de qualidade da água (WAQ) simula os processos físicos e químicos envolvidos na dinâmica de substâncias específicas (tais como Nitrogênio, Fósforo, OD, DBO, Clorofila-a) e a interação entre elas. Este modelo requer que o modelo hidrodinâmico (FLOW) seja simulado simultaneamente ou que ele já tenha sido rodado anteriormente.

Todas as simulações foram realizadas utilizando as versões 3D dos modelos, ou seja, foram consideradas variações nas direções horizontal e vertical. Em termos hidrodinâmicos, a modelagem considera o formato do reservatório, a ocorrência de curvas e de regiões de estagnação. Já na qualidade da água, a hipótese tridimensional permite uma representação mais realista da distribuição espacial das concentrações das substâncias. Por considerar variações na vertical, é possível analisar os gradientes verticais de velocidade e de temperatura e, conseqüentemente, a estratificação química de substâncias de interesse. De maneira geral, a modelagem tridimensional torna o problema mais complexo, porém pode fornecer resultados mais detalhados.

O Delft3D<sup>®</sup> foi concebido para simulação do corpo d'água como um todo, e não da hidrodinâmica de regiões próximas a estruturas hidráulicas, tais como o vertedouro e a tomada d'água. Esta é uma das principais limitações do modelo, que são de difícil representação na malha numérica desse tipo de modelo.

O sistema Delft3D<sup>®</sup> já foi adotado em mais de uma centena de estudos e projetos envolvendo modelagem de corpos de água naturais, dentre eles reservatórios, estuários e baías. Além disso, vem sendo usado internacionalmente para simular a qualidade da água de reservatórios. Alguns exemplos de aplicações, citados a seguir, mostram que se trata de um modelo já estabelecido, bem avaliado e validado na literatura. Por essa razão, este modelo foi selecionado para o presente estudo.

O modelo foi validado por vários estudos, tanto em laboratório quanto em campo (GERRITSEN et al., 2007). Chao et. al., 2010 obtiveram boa aderência dos resultados do modelo (nutrientes e clorofila) com os dados de campo ao aplicarem o Delft3D-WAQ em um lago do Delta do Mississippi. No Brasil, este módulo foi aplicado com sucesso,

por exemplo, para a Lagoa dos Patos (Rio Grande do Sul) para avaliar a qualidade de água para uma região com intrusão salina (PEREIRA, 2003). Em Garcia (2008), o modelo foi aplicado para o reservatório de Itaipu com o objetivo de avaliar a circulação de suas águas e o transporte de sedimentos, permitindo identificar áreas que apresentam maiores percentuais de erosão/deposição.

O modelo também foi utilizado para a análise da qualidade da água em reservatórios de usinas hidrelétricas, sendo o da própria UHE Belo Monte um dos exemplos (EnvEx, 2014). Nas aplicações para reservatórios internacionalmente conhecidos podem ser citados os trabalhos de Pan Xiao-Dong et al. (2009), onde foi simulada a qualidade da água dos três primeiros anos do reservatório de Huadao na China e de Chanudet et al. (2012), cujo modelo simula a hidrodinâmica do reservatório hidrelétrico de Nam Theun 2, localizado na Indochina, na República Democrática de Laos; este último foi complementado por Smits et al (2009), que trata da qualidade da água e emissão de gases de efeito estufa.

Com base nos manuais e textos disponíveis, na sequência é apresentada uma descrição dos módulos utilizados nas simulações. Maiores informações sobre o Delft3D® podem ser encontradas em <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>.

### 2.2.1. **Descrição do modelo de Circulação Hidrodinâmica (Delft3D-Flow)**

O módulo hidrodinâmico resolve as equações de águas rasas transientes, é um sistema formado pelas equações de balanço de massa e de quantidade de movimento para escoamentos com superfície livre. Ele assume distribuição hidrostática de pressões, ou seja, as acelerações na direção vertical são desprezíveis. As demais hipóteses adotadas na formulação matemática do modelo são: hipótese do contínuo, escoamento incompressível, e a hipótese de Boussinesq, que consiste em considerar a aceleração do fluxo menor que a da gravidade e, portanto, as variações da densidade só são importantes quando afetam os termos gravitacionais e não os termos de inércia. A turbulência é resolvida através da decomposição de Reynolds e conta com quatro modelos de fechamento: coeficiente constante, método algébrico, modelo  $\kappa$ -L e modelo

$\kappa$ - $\epsilon$ . Este trabalho utilizou o modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  por se tratar de um modelo mais preciso que os demais em relação aos processos em consideração.

O modelo pode usar vários tipos de sistemas de coordenadas (retilínea, curvilínea e esférica) na horizontal e na vertical (sistema de coordenadas sigma e cartesiano). Neste estudo optou-se por utilizar malhas retilíneas na horizontal e vertical, já que um dos objetivos é analisar os processos de estratificação. As camadas de temperaturas distintas no meio ambiente geralmente são horizontais, sendo melhor representadas com uma grade cartesiana. As formulações matemáticas também levam em consideração fenômenos físicos que ocorrem em reservatórios (DELFT3D-FLOW, 2014), por exemplo:

- Gradientes da superfície livre (efeitos barotrópicos);
- Efeitos da rotação da terra;
- Variabilidade da densidade da água (equação de estado);
- Efeitos baroclínicos (estratificação e correntes de densidade);
- Turbulência induzida por introdução de fluxos de massa e quantidade de movimento;
- Transporte de sal, calor e outros constituintes;
- Variabilidade espacial e temporal da tensão de cisalhamento gerada pelo vento sobre a superfície da água modelada por uma lei de atrito quadrática;
- Variabilidade espacial da tensão de cisalhamento exercido pelo fluxo turbulento no fundo baseado em uma fórmula quadrática Chézy ou Manning no fundo;
- Variabilidade espacial e temporal da pressão atmosférica na superfície da água;
- Variação temporal de fontes e sumidouros;
- Troca de calor com a superfície;
- Evaporação e precipitação;
- Tensão de cisalhamento nas paredes laterais;
- Troca vertical de quantidade de movimento devido a ondas internas.

A seguir é apresentado o equacionamento utilizado na modelagem hidrodinâmica.

### Equacionamento da modelagem hidrodinâmica



O modelo usa métodos de diferenças finitas para a solução das equações hidrodinâmicas. As equações necessárias para calcular as quatro incógnitas da circulação hidrodinâmica, velocidade na direção x, velocidade na direção y, velocidade na direção z e  $\zeta$  elevação da superfície livre (u, v, w, respectivamente), depende principalmente das equações da continuidade e do momento em diferentes direções.

### Grade Curvilínea

O Delft3D<sup>®</sup> oferece três sistemas de coordenadas na qual pode operar:

- Sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z);
- Sistema de coordenadas curvilíneas ortogonais ( $\xi, \eta, \sigma$ ); e
- Sistema de coordenadas esféricas ( $\lambda, \phi, \sigma$ ).

Contornos de sistemas ambientais são naturalmente curvos, dificultando sua representação por grades retangulares. A representação de forma inadequada pode gerar erros de discretização. Para redução destes erros pode ser utilizada a grade ortogonal curvilínea ou uma grade retangular de alta resolução. No sistema de coordenadas curvilíneas, os elementos (superfície livre; batimetria) são referenciadas em relação a um plano horizontal de referência. A Figura 5 esboça a diferença entre uma grade retangular e uma curvilínea. Ambos foram testados neste estudo e foi optado para a grade retangular, já que esta foi mais eficiente e mais estável considerando períodos de simulação de mais de um ano e as resoluções numéricas adotadas.

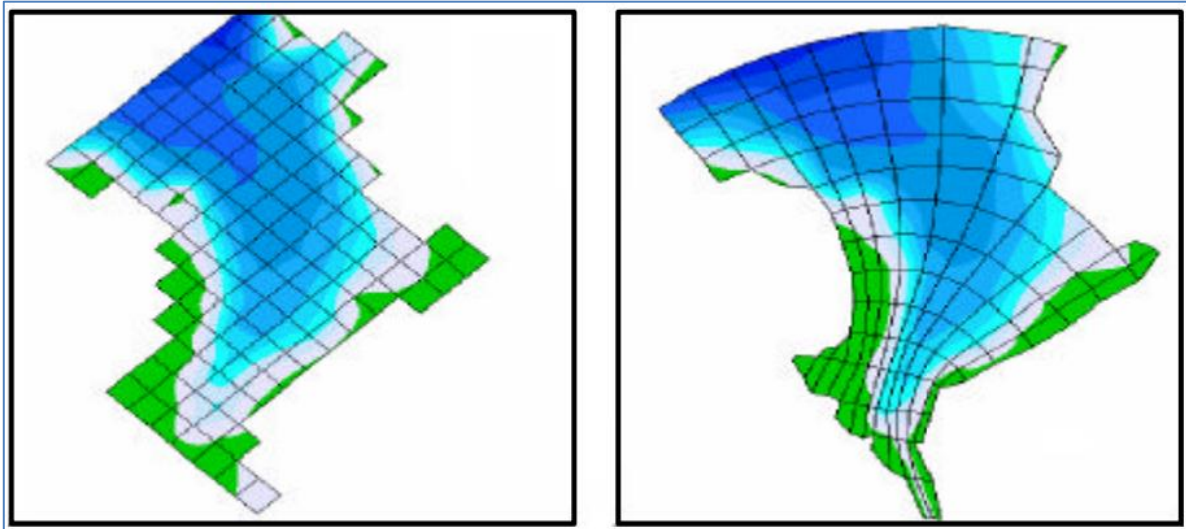


Figura 5: Exemplos de grade retangular (esquerda) e curvilínea (direita).

### O Sistema De Camadas

O eixo vertical consiste em camadas limitadas por planos retos ou planos sigma ( $\sigma$ ), os quais não são necessariamente horizontais, no entanto, seguem a batimetria e o nível d'água. Através dessa representação para o eixo vertical, obtém-se uma aparência suavizada para a batimetria. A Figura 6 ilustra um exemplo para coordenada  $\sigma$  (em vermelho) e coordenadas z (linhas horizontais).

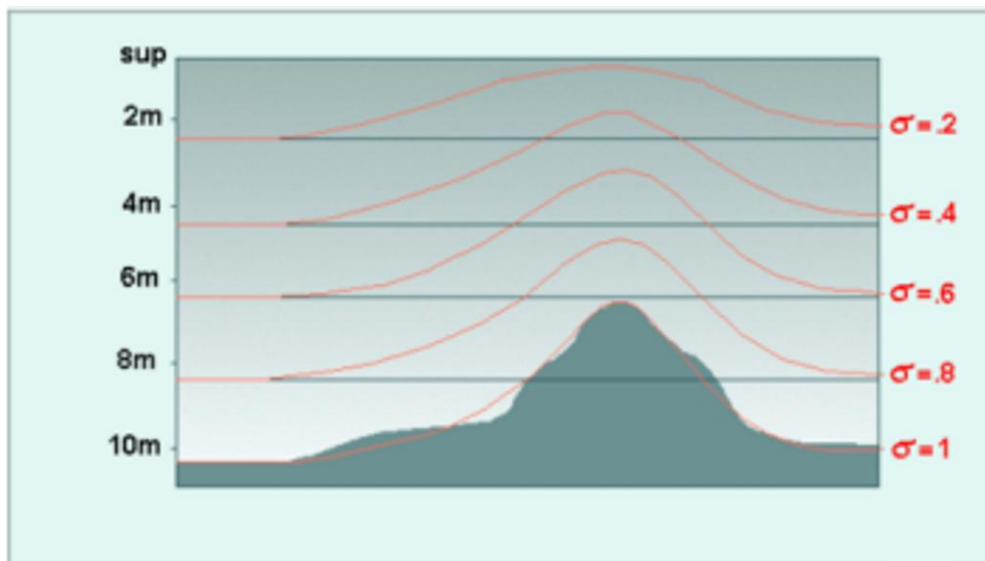


Figura 6: Coordenadas Sigma ( $\sigma$ ) (Fonte: <https://www.meted.ucar.edu>).

A vantagem da coordenada sigma é que o número de camadas é constante em todo o domínio, independentemente da profundidade local. Porém a desvantagem é a curvatura que pode criar difusão numérica especialmente na região da termoclina que geralmente é horizontal. A desvantagem da coordenada z é a baixa resolução vertical em áreas rasas, e a vantagem é a boa representação da termoclina em sistemas estratificados. Por isto, no presente estudo foi optado para uma grade cartesiana com alta resolução na vertical, tentando assim representar a estratificação com melhor precisão.

### Passo de Tempo e Estabilidade Numérica

O passo de tempo é um parâmetro importante nas simulações computacionais. Ele influencia diretamente o tempo de simulação. Por exemplo, uma simulação hidrodinâmica utilizando passo de tempo de 1 min levou 21 h para completar uma simulação de um período de 14 meses com o uso de quatro processadores em paralelo sem *hyper-threading* (isto é, 4 núcleos físicos). O passo de tempo computacionalmente necessário para garantir estabilidade numérica é verificado utilizando o valor do número de Courant ( $C_r$ ).

$$C_r = \Delta t \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}\right)} (|\vec{V}| + \sqrt{gH})$$

Onde  $C_r$  = número de Courant;  $\Delta t$  = passo de tempo (s);  $\Delta x$  = espaçamento médio longitudinal dos nós da malha (m);  $\Delta y$  = espaçamento médio transversal dos nós da malha (m);  $|\vec{V}|$  = módulo da velocidade de corrente (em geral na prática, este valor é desprezível por ser muito menor que  $\sqrt{gH}$ );  $H$  = profundidade média local (m);  $g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ). Geralmente, o número de Courant não deve exceder um valor de 10, mas por problemas de pequenas variações no espaço e tempo, o número de Courant pode ser substancialmente maior (Delft3D-FLOW, 2014).

### Equações da Quantidade de Momento na Direção Horizontal

As equações da quantidade de momento nas direções  $\xi$  e  $\eta$  são (Delft3D-FLOW, 2014):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - f v \\ = \frac{-1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f u \\ = \frac{-1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned}$$

onde  $\sqrt{G_{\xi\xi}}$  = coeficiente usado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares;  $\sqrt{G_{\eta\eta}}$  = coeficiente usado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares (ambos = 1 no caso da grade retangular);  $\xi$  = coordenadas no sistema cartesiano, longitude;  $\eta$  = coordenadas no sistema cartesiano, latitude;  $u$  = componente da velocidade integrada verticalmente na direção  $\xi$ ;  $v$  = componente da velocidade integrada verticalmente na direção  $\eta$ ;  $H$  = profundidade total da água;  $\sigma$  = coordenada vertical;  $f$  = parâmetro de Coriolis;  $t$  = tempo;  $v_V$  = coeficiente de viscosidade vertical;  $P_\eta$ ,  $P_\xi$  = gradientes de pressão hidrostática;  $F_\eta$ ,  $F_\xi$  = força devido aos fluxos turbulentos;  $M_\eta$ ,  $M_\xi$  = contribuições devido a fontes externas.

As variações da densidade são negligenciadas, exceto nos termos de pressão baroclínica,  $P_\eta$  e  $P_\xi$  representam os gradientes de pressão. As forças  $F_\eta$ ,  $F_\xi$  na equação do movimento representam o desequilíbrio na tensão horizontal de Reynolds. A velocidade vertical  $w$  do sistema de coordenadas  $\sigma$  é calculada com base na equação da continuidade.  $M_\eta$ ,  $M_\xi$  representam as contribuições externas (fontes ou sumidouros) – forças externas devido a estruturas hidráulicas externas, descarga ou fonte de água, cisalhamento devido a ondas, etc. (GERRITSEN et al., 2007).

### Equação da Continuidade

A equação da continuidade é dada por (DELFT3D-FLOW, 2014):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q$$

Onde  $\sqrt{G_{\xi\xi}}$  = coeficiente usado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares ( $\sqrt{G_{\xi\xi}}$  é igual o raio da Terra vezes o cosseno da latitude);  $\sqrt{G_{\eta\eta}}$  = coeficiente usado na transformação de coordenadas curvilíneas para coordenadas retangulares (ambos = 1 no caso da grade retangular);  $\xi$  = coordenadas no sistema cartesiano, longitude;  $\eta$  = coordenadas no sistema cartesiano, latitude;  $U$  = componente da velocidade integrada verticalmente na direção  $\xi$ ;  $V$  = componente da velocidade integrada verticalmente na direção  $\eta$ ;  $d$  = profundidade da água abaixo do plano de referência;  $Q$  = contribuição por unidade de área devido à descarga.

### Hipótese de Pressão Hidrostática

Para o sistema em estudo, pelas equações de águas rasas, a equação vertical para o momento é restringida pela equação de pressão hidrostática. As acelerações verticais devido aos efeitos de fluatibilidade, assim como aquelas devidas às rápidas variações da topografia de fundo (batimetria) não são consideradas. Portanto, para a direção vertical (DELFT3D-FLOW, 2014):

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -\rho g H$$

Após a integração, a pressão hidrostática é dada por:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma'$$

Adotando-se a densidade da água como sendo constante e considerando a pressão atmosférica, o gradiente de pressão barotrópica será (DELFT3D-FLOW, 2014):

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi}$$

$$\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta}$$

### Componente Vertical da Velocidade

A componente vertical da velocidade ( $\omega$ ), no sistema de coordenadas sigma, pode ser escrita junto com a equação da continuidade da seguinte forma (DELFT3D-FLOW, 2014):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}} \frac{\partial [(d + \eta)u\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}} \frac{\partial [(d + \eta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \zeta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out})$$

A velocidade vertical  $\omega$  é definida em relação às isolinhas  $\sigma$ . A velocidade vertical em coordenadas cartesianas ( $w$ ) pode ser escrita em função das componentes horizontais da velocidade, da profundidade da coluna de água, da elevação da superfície livre e da componente de velocidade  $\omega$  como:

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}} \left[ u \sqrt{G_{\zeta\zeta}} \left( \sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right) + v \sqrt{G_{\zeta\zeta}} \left( \sigma \frac{\partial H}{\partial \zeta} + \frac{\partial \eta}{\partial \zeta} \right) \right] + \left( \sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right)$$

### Parâmetro de Coriolis

O parâmetro de Coriolis ( $f$ ) depende da latitude geográfica ( $\phi$ ) e da velocidade angular de rotação da Terra,  $\Omega$ ; é dado por  $f = 2\Omega \sin \phi$  (DELFT3D-FLOW, 2014). Porém, pelo tamanho do reservatório em consideração os efeitos de Coriolis serão de menor importância.

### Tensões de Reynolds

As forças  $F_{\xi}$  e  $F_{\eta}$ , das equações de quantidade de movimento, representam o desequilíbrio da tensão horizontal de Reynolds. Os gradientes verticais são obtidos ao longo do plano  $\sigma$ ,  $F_{\xi}$  e  $F_{\eta}$  e são dados por (DELFT3D-FLOW, 2014):

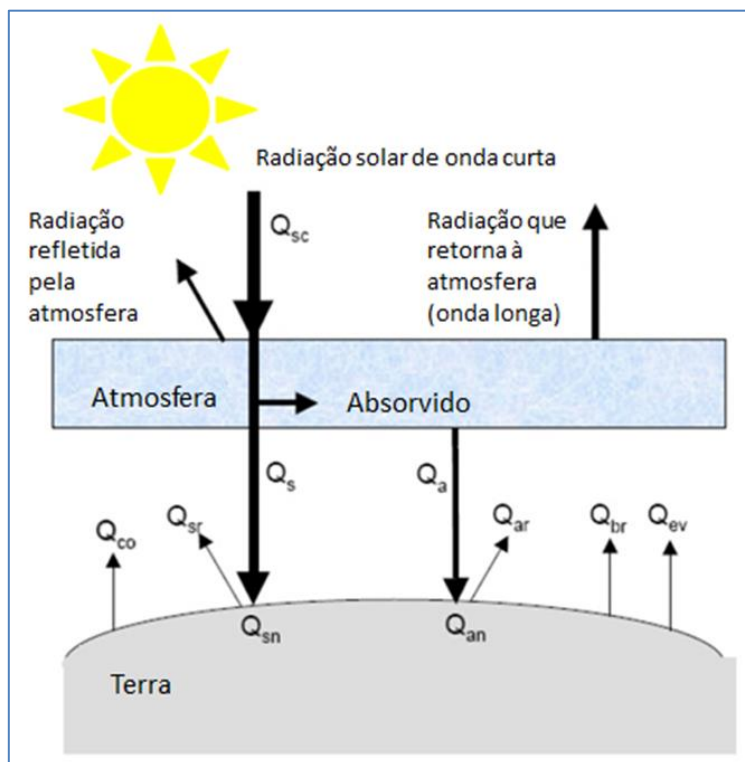
$$F_{\xi} = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta}$$

$$F_{\eta} = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta}$$

### 2.2.2. **Transferência de calor – modelo de temperatura**

A radiação solar emitida pelo Sol chega à superfície da Terra na forma de ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda da ordem de 0,15 a 4  $\mu\text{m}$ . Na atmosfera a radiação pode ser absorvida, espalhada, emitida ou refletida por nuvens, poeira e partículas. Na média, nem a atmosfera nem a Terra acumulam calor, o que implica que o calor absorvido é emitido novamente (DELFT3D-FLOW, 2014). Um esquema das trocas de radiação e fluxos de calor na superfície da água é apresentado na Figura 7.

São considerados os seguintes fluxos e radiações, todos em  $\text{W}/\text{m}^2$ : radiação de céu claro  $Q_{sc}$ , radiação solar (de onda curta)  $Q_s$ , radiação solar refletida  $Q_{sr}$ , radiação solar líquida incidente (onda curta)  $Q_{sn}$ , radiação atmosférica (onda longa)  $Q_a$ , radiação atmosférica refletida  $Q_{ar}$ , radiação atmosférica líquida incidente (onda longa)  $Q_{an}$ , radiação emitida pela superfície (onda longa)  $Q_{br}$ , fluxo de calor latente (evaporação)  $Q_{ev}$  e fluxo de calor sensível (convecção)  $Q_{co}$ .



**Figura 7: Visão geral dos mecanismos de troca de calor na superfície.**

As trocas de calor na superfície são modeladas no Delft3D-Flow tendo em vista os processos de radiação solar e atmosférica, perdas por evaporação, convecção e retorno da radiação. Existem diversas formulações empíricas desenvolvidas para calcular estes processos. A maioria relacionada com parâmetros como velocidade do vento, umidade e nebulosidade. Além disso, cada definição dos parâmetros empíricos é feita para um ambiente, algumas para oceanos e outras para lagos.

Existem cinco modelos de fluxo de calor implementados no Delft3D-FLOW:

- *Heat Flux 1*: A radiação solar total para céu claro deve ser fornecida. Os componentes restantes do balanço térmico são estimados através da nebulosidade média, temperatura do ar, umidade e área da superfície da água;
- *Heat Flux 2*: A radiação solar líquida e a radiação atmosférica líquida devem ser fornecidas. Os componentes restantes do balanço térmico são estimados através da nebulosidade média, temperatura do ar, umidade e área da superfície da água;



- *Excess temperature model*: Calcula as trocas de calor entre água e ar a partir de um único dado - temperatura natural de fundo ou temperatura de background;
- *Murakami model - heat flux model 4*: O dado de entrada é a radiação solar líquida ou a soma desta com a radiação atmosférica líquida. A radiação, absorvida pelo corpo aquático, se dá em função da profundidade. Os componentes restantes do balanço térmico são estimados através da nebulosidade média, temperatura do ar, umidade, profundidade de Secchi média, área da superfície da água e o número de Dalton. O fluxo de calor latente foi calibrado para o Japão;
- *Ocean model - heat flux model 5*: Necessita de dados de nebulosidade, temperatura, umidade, constantes de Dalton e Staton e área da superfície da água. Todos os termos do balanço são estimados por estes parâmetros. Opcionalmente, a radiação solar líquida pode ser fornecida como dado de entrada.

O *Ocean Model* – utilizado neste estudo - resolve os principais processos térmicos de um reservatório, como fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e radiação. De acordo com Gill (1982) e Lane (1989), o modelo foi calibrado para o Mar do Norte (região do oceano Atlântico, situada entre as costas da Noruega e da Dinamarca) e aplicado com sucesso em grandes lagos.

Nesse modelo, as parcelas do fluxo de calor utilizadas são  $Q_{sn}$ ,  $Q_{eb}$ ,  $Q_{ev}$  e  $Q_{co}$ . As relações usadas para o cálculo desses termos, de acordo com a descrição apresentada em Delft3D-FLOW (2014) são apresentadas a seguir.

A radiação solar incidente líquida  $Q_{sn}$ , que representa o balanço entre as radiações solar incidente e refletida de ondas curtas, é definida por:

$$Q_{sn} = Q_s - Q_{sr} = (1 - \alpha)Q_{sc}f(F_c)$$

onde  $\alpha$  é o albedo (cujo valor para esse modelo é 0,06);  $F_c$  é a fração de céu coberto por nuvens (definido pelo usuário),  $f(F_c)$  é a função  $f(F_c) = 1 - 0,4F_c - 0,38F_c^2$  e o calor  $Q_{sc}$  é a radiação de céu claro dada por (Gill, 1982):

$$Q_{sc} = \begin{cases} 0,76 \operatorname{sen}(\gamma), & \operatorname{sen}(\gamma) \geq 0 \\ 0, & \operatorname{sen}(\gamma) < 0 \end{cases}$$

onde  $\gamma$  é o ângulo de elevação do sol, que varia no tempo  $t$  e da latitude  $\phi$  de acordo com:

$$\text{sen}(\gamma) = \text{sen}(\delta)\text{sen}\left(\frac{\pi\phi}{180}\right) - \cos(\delta)\cos\left(\frac{\pi\phi}{180}\right)\cos(\omega_1 t)$$

com:

$$\delta = \frac{23,5\pi}{180}\cos(\omega_0 t - 2,95)$$

onde  $\omega_0$  é a frequência de variação anual e  $\omega_1$  é a frequência de variação diurna.

Neste modelo é possível especificar a radiação solar incidente de ondas curtas ( $Q_{sn}$ ) ou ainda calcular através do modelo de cobertura de nuvens.

A radiação emitida  $Q_{eb}$ , ou seja, a quantidade de calor que é refletida pela superfície pode ser obtida por:

$$Q_{eb} = \varepsilon\sigma\bar{T}_s^4(0,39 - 0,05\sqrt{e_a})(1 - 0,6F_c^2)$$

onde,  $\sigma = 0,7$  (número de Prandtl para o ar),  $e_a$  é a pressão de vapor dada por  $e_a = r_{hum} 10^{\frac{0,7859+0,03477T_\alpha}{1+0,00412T_\alpha}}$ ,  $\varepsilon$  é o fator de emissividade igual a 0,985 para a água (SWEERS, 1976; OCTAVIA et al, 1977);  $r_{hum}$  é a umidade relativa do ar e  $T_\alpha$  é a temperatura do ar em Kelvin.

O termo  $Q_{ev}$  (calor latente de evaporação) é a soma de duas parcelas, representa o calor perdido por evaporação esse termo considera duas parcelas, isto é,

$$Q_{ev} = Q_{ev,forçado} + Q_{ev,livre}$$

onde  $Q_{ev,forçado}$  é dado por

$$Q_{ev,forçado} = L_v\rho_a f(U_{10})\{q_s(T_s) - q_a(T_a)\}$$

sendo  $\rho_a$  a densidade do ar,  $L_v$  o calor latente de vaporização em J/kg da água ( $L_v = 2,5 \times 10^6 - 2,3 \times 10^3 T_s$ ); o vento sem a influência de convecção livre é dado por:  $f(U_{10}) =$

$c_e U_{10}$ , com  $c_e = 0,0015 \cdot q_s$  e  $q_a$  são as umidades específicas de saturação do ar e do ar não-saturado dadas por

$$q_s(T_s) = \frac{0,62e_s}{P_{atm} - 0,38e_s} \text{ e } q_a(T_a) = \frac{0,62e_a}{P_{atm} - 0,38e_a}.$$

As pressões de vapor de saturação  $e_s$  e do ar  $e_a$  são dadas por  $e_a = r_{hum} 10^{\frac{0,7859+0,03477T_a}{1+0,00412T_a}}$  e  $e_s = 10^{\frac{0,7859+0,03477T_s}{1+0,00412T_s}}$ .  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica.

$Q_{ev,livre}$  possui a seguinte formulação:

$$Q_{ev,livre} = k_s L_v \bar{\rho}_a (q_s - q_a)$$

onde a densidade média do ar é dada por:  $\bar{\rho}_a = \frac{\rho_{a0} + \rho_{a10}}{2}$ , e o coeficiente de transferência de calor é dado por

$$k_s = c_{fr,conv} \left\{ \frac{g\alpha^2}{\nu_{ar}\bar{\rho}_a} (\rho_{a10} - \rho_{a0}) \right\}^{\frac{1}{3}}.$$

O coeficiente de convecção livre calibrado é  $c_{fr,conv} = 0,14$  (RYAN et al, 1974). A viscosidade do ar é  $\nu_{ar} = 16 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s e a difusividade do ar é  $\alpha = \frac{\nu_{ar}}{\sigma}$  (m<sup>2</sup>/s), com  $\sigma = 0,7$  (número de Prandtl para o ar). Ainda, a densidade do ar saturado é

$$\rho_{a0} = \frac{\frac{100P_{atm} - 100e_s}{R_{seco}} + \frac{100e_s}{R_{vap}}}{T_{ar} + 273,15}$$

e a densidade do ar, a 10 m da superfície é

$$\rho_{a10} = \frac{\frac{100P_{atm} - 100e_a + 100e_a}{R_{seco}} + \frac{100e_a}{R_{vap}}}{T_{ar} + 273,15}.$$

$R_{seco}$  é a constante dos gases para ar seco (287,05 J/kg/mol) e  $R_{vap}$  é a constante dos gases para a vapor d'água.

O fluxo de calor sensível  $Q_{co}$  também pode ser obtido a partir de duas parcelas, ou seja,

$$Q_{co} = Q_{co,forçado} + Q_{co,livre}.$$

A parcela  $Q_{co,livre}$  é dada por:

$$Q_{co,livre} = k_s \bar{\rho}_a c_p (T_s - T_a)$$

onde  $k_s$  é o coeficiente de transferência de calor,  $\bar{\rho}_a$  densidade média do ar,  $T_s$  é a temperatura da superfície,  $T_a$  a temperatura do ar e  $c_p$  é o calor específico do ar ( $c_p = 1004 \text{ J/kg/K}$ ). A outra parcela é dada por:

$$Q_{co,forçado} = \rho_a c_p g(U_{10})(T_s - T_a)$$

onde a função de velocidade do vento é dada por (GILL, 1982):

$$g(U_{10}) = c_H U_{10}.$$

Com base nas formulações de cada um dos termos de transferência de calor envolvidos nesse modelo, um resumo as constantes utilizadas que possuem dependência temporal são:  $Q_{sn}$ ,  $T_a$ ,  $r_{hum}$  e  $F_c$ .

### 2.2.3. **Modelo de Qualidade da Água**

O modelo de Qualidade de Água e Eutrofização, considera escalares passivos e não-conservativos. Escalares não-conservativos, que representam a maioria das substâncias existentes na água, sofrem modificação de concentração através de processos físicos, biológicos e químicos. Os processos biológicos e químicos, chamados de reações cinéticas, são definidos para cada substância, sendo, portanto, o diferencial deste modelo. O entendimento e a formulação destes processos são fundamentais para a construção do modelo de qualidade de água. Neste modelo, o campo de velocidades é conhecido, ou seja, o escalar transportado não altera a hidrodinâmica do corpo de água receptor.

O modelo Delft3D-WAQ resolve as equações de advecção, difusão e reações químicas para diversas substâncias (Delft3D-WAQ, 2014). Além das substâncias pré-definidas é possível customizar processos e adicionar substâncias. O Delft3D-WAQ tem sido aplicado em estudos de:

- Eutrofização de lagos, reservatórios, estuários e oceanos;
- Modelagem de oxigênio dissolvido em sistemas estratificados;
- Impacto da disposição de efluentes na concentração de nutrientes e produção primária;
- Transporte de metais pesados em estuários;
- Acumulação de micropoluentes orgânicos em bacias hidrográficas;
- Emissão de gases de efeito estufa em reservatórios;
- Transporte de sedimentos.

As substâncias e os processos biológicos, físicos e químicos modelados nesse estudo estão listadas na Tabela 4.

*Tabela 4: Substâncias e processos modelados no DELFT3D-WAQ.*

<b>Substância</b>	<b>Processos modelados</b>
<b>Oxigênio Dissolvido (OD)</b>	Absorção de nutrientes pelo crescimento de algas
	Desnitrificação na coluna de água
	Nitrificação
	Reaeração
	Mineralização
	Oxidação de DBO
	Produção primária e mortalidade de algas
Demanda de oxigênio pelo sedimento	
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Oxidação
	Sedimentação
<b>Nitrogênio Amoniacal (NH<sub>4</sub>)</b>	Nitrificação
	Mineralização
	Liberação de nutrientes pelas algas
<b>Nitrato (NO<sub>3</sub>)</b>	Absorção de nutrientes pelo crescimento de algas
	Desnitrificação na coluna de água

Substância	Processos modelados
	Desnitrificação no sedimento Nitrificação
Fósforo Inorgânico (PO <sub>4</sub> )	Absorção de nutrientes pelo crescimento de algas Adsorção/Desorção Mineralização Liberação de Nutrientes pela mortalidade das algas
Nitrogênio Orgânico	Mineralização
Fósforo Orgânico	Mineralização
Algas	Produção primária e mortalidade de algas Sedimentação Limitação da produção primária

O módulo WAQ realiza o balanço de massa para cada célula computacional e para cada substância. A massa transportada entre células computacionais representa fluxo negativo em uma e positivo na outra. Desta maneira o método, por si só, conserva a massa no sistema. Quando uma substância pode ser convertida em outra, um processo deve ser adicionado. Por exemplo, a conversão da amônia para nitrato resulta em fluxo negativo de massa para a amônia e fluxo positivo para o nitrato. Além disso, fontes e sumidouros externos podem ser adicionados em cada célula, podendo representar um aporte de alguma substância.

O módulo de qualidade da água (Delft3D-WAQ) se utiliza do método numérico de volumes finitos para resolver a equação de advecção, difusão e reações:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} - D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} - D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} - D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = S + f_R(C,t);$$

nesta equação C é a concentração de uma substância, e  $v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$  são as velocidades nas direções x, y e z respectivamente.  $D_x$ ,  $D_y$  e  $D_z$  são os coeficientes de difusão (turbulenta e molecular) respectivamente nas direções x, y e z; S é o conjunto de termos fonte (ou sumidouros) que representam, por exemplo, a descarga (ou tomada) de um efluente em um determinado ponto. O termo  $f_R$  descreve os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem com as substâncias. Exemplos de processos físicos desse

termo são: fixação de material particulado, evaporação e volatilização. Já os processos químicos ou biológicos têm como exemplos: reações químicas diversas, predação e conversões realizadas por organismos vivos.

O modelo considera somente processos de conversão entre substâncias que podem ser descritas por uma equação diferencial parcial do tipo:

$$\left( \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial t} \right)_R = f_R(\bar{C}_1, \bar{C}_2, \dots, \bar{C}_N, t)$$

onde  $C_i$  é a concentração em um dado local para a substância  $i$ ,  $N$  é o número de substâncias e  $t$  é o tempo. O termo  $f_R$  representa uma função matemática qualquer que deve descrever a variação de uma substância no interior da célula computacional em função de sua interação com outras substâncias que se encontram nessa célula.

O esquema de discretização usado pelo Delft3D-WAQ é uma grade estruturada que divide o sistema em células com volumes, dimensões, área de superfície e vizinhança definidas.

A Figura 8 mostra um esquema de grade estruturada aplicada a um lago. Nota-se que as células podem ter fronteiras com atmosfera, sedimentos e linha da costa. Essa grade permite que o WAQ utilize os parâmetros hidrodinâmicos calculados pelo módulo FLOW.

O Delft3D-WAQ possui 22 esquemas numéricos que podem ser escolhidos pelo usuário. Neste trabalho utilizou-se o esquema 22, que é um método auto-adaptivo que alia desempenho e alta qualidade nos resultados.

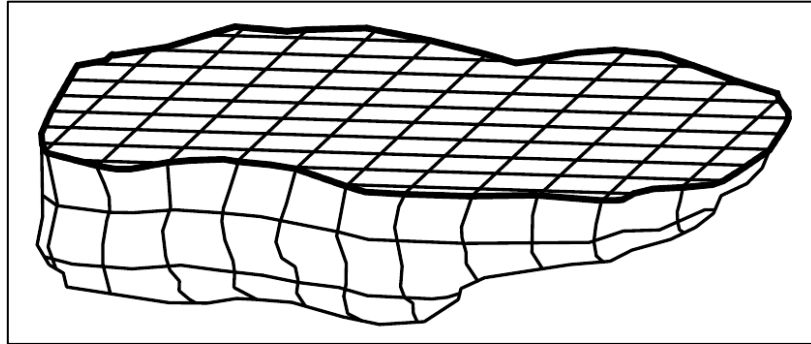


Figura 8: Esquema de uma grade estruturada com volumes finitos. Fonte: (Delft3D-WAQ, 2013).

Os parâmetros de qualidade da água são divididos em grupos funcionais no Delft3D-WAQ (Figura 9). A descrição de todos os processos pode ser encontrada no manual do modelo (Delft3D-WAQ, 2014). A modelagem matemática de qualidade da água realizada pelo modelo Delft3D-WAQ segue os conceitos e os princípios do estado da arte. Os conceitos básicos de modelagem de qualidade da água podem ser encontrados em Chapra (1996), Thomann e Muller (1987), Chapman (1996) e Laws (1993). A Tabela 5 mostra os principais parâmetros do modelo.

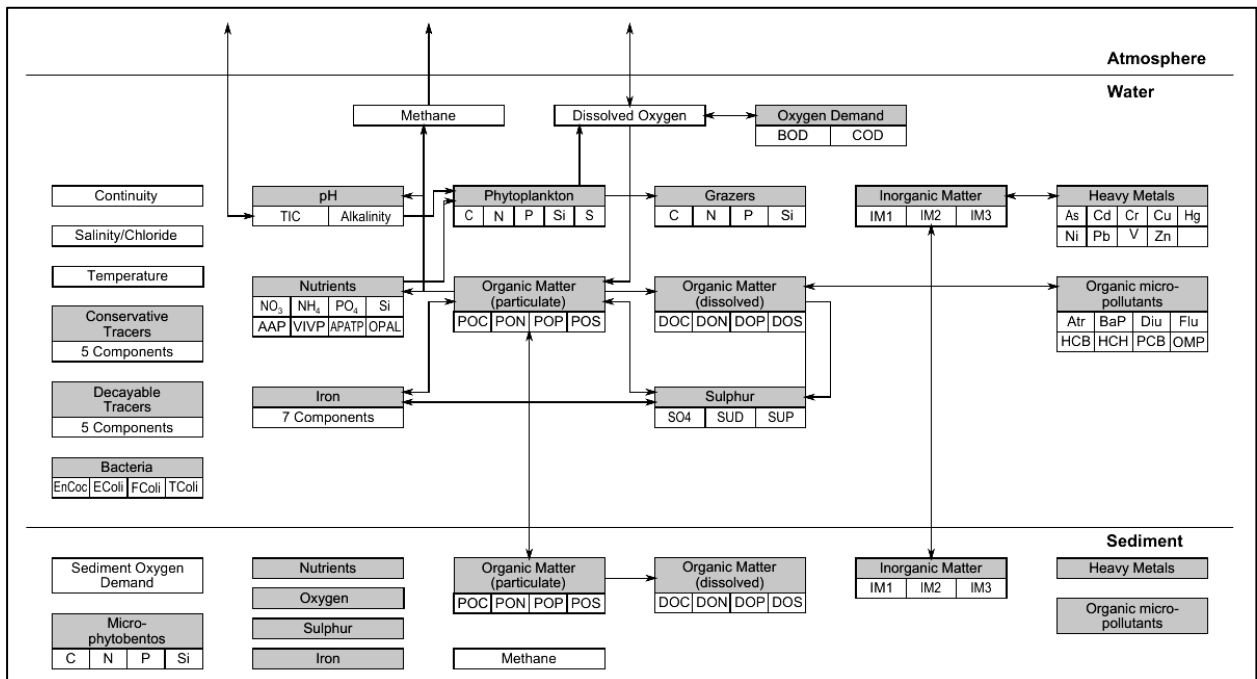


Figura 9: Esquema geral das substâncias incluídas no módulo WAQ do Delft3D®. As substâncias são organizadas em grupos funcionais e estão indicadas pelos cabeçalhos em cinza. As principais relações são representadas pelas setas. Fonte: (Delft3D-WAQ, 2014).



Tabela 5: Principais parâmetros e sua descrição.

<b>Código</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
NCRatGreen	Razão Nitrogênio/Carbono para Algas Verdes	(gN/gC)
PCRatGreen	Razão Fósforo/Carbono para Algas Verdes	(gP/gC)
Grtochl	Razão Clorofila-a/Carbono para Algas Verdes	(mgChlfa/gC)
RcDenSed	Taxa de desnitrificação no sedimento (1ª ordem)	(m/d)
CTDEN	Temperatura crítica para desnitrificação	(°C)
RcDen20	Taxa de reação de desnitrificação a 20°C (Michalis-Menten)	(gN/m <sup>3</sup> /d)
TcDenWat	Coeficiente de temperatura para desnitrificação na água	(-)
KsNiDen	Constante de meia saturação para nitratos	(gN/m <sup>3</sup> )
KsOxDen	Constante de meia saturação para limitação de oxigênio.	(g/m <sup>3</sup> )
COXDEN	Concentração crítica de oxigênio para desnitrificação	(g/m <sup>3</sup> )
RcDenWat	Taxa de desnitrificação na água (1ª ordem)	(1/d)
OOXDEN	Concentração ótima de oxigênio para desnitrificação	(gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Curvat	Curvatura da função de OD para desnitrificação	(-)
RcNit20	MM- taxa de nitrificação a 20°C	(gN/m <sup>3</sup> /d)
TcNit	Coeficiente de temperatura para nitrificação	(-)
KsAmNit	Constante de meia saturação para consumo de amônio.	(gN/m <sup>3</sup> )
KsOxNit	Constante de meia saturação para consumo de oxigênio.	(g/m <sup>3</sup> )
CTNit	Temperatura crítica para nitrificação	(°C)
COXNIT	Concentração crítica de oxigênio para nitrificação.	(g/m <sup>3</sup> )
RcNit	Taxa de nitrificação (1ª ordem)	(1/d)
OOXNIT	Concentração ótima de oxigênio para nitrificação.	(gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
KLRear	Coeficiente de transferência de oxigênio	(1/d)
TCRear	Coeficiente de temperatura para transferência de oxigênio	(-)
SWRear	Modelo de Reação	(-)
RcBOD	Taxa de decaimento da DBO a 20°C	(1/d)
TcBOD	Coeficiente de temperatura para DBO	(-)
TcCOD	Coeficiente de temperatura para COD	(-)
TcBODN	Coeficiente de temperatura para DBO-N	(-)
BOD5/uPHYT	Razão DBO <sub>5</sub> : DBOu no fitoplâncton	(-)
OXCCF	Razão O <sub>2</sub> : C na mineralização	(gO <sub>2</sub> /gC)
KMOX	Constante de meia saturação para limitação da oxidação da DBO	(gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
fSOD	Demanda de oxigênio no sedimento	(gO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /d)
RcSOD	Taxa de decaimento do SOD à 20°C	(1/d)

<b>Código</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
TcSOD	Coeficiente de temperatura do decaimento de SOD	(-)
TcGroGreen	Coeficiente de temperatura para crescimento de algas	(-)
TcDecGreen	Coeficiente de temperatura para respiração e mortalidade das algas	(-)
PPMaxGreen	Máxima taxa de produção das algas verdes	(1/d)
GRespGreen	Fator de respiração de algas durante crescimento	(-)
V0SedGreen	Velocidade de sedimentação das algas	(m/d)
MinDepth	Profundidade mínima para sedimentação	(m)
TaucSGreen	Tensão de cisalhamento crítica para sedimentação de algas	(N/m <sup>2</sup> )
SWRegrVB01	Permite rebrota/crescimento da vegetação (sim=1, não=0)	(-)
RcMRTVB01	Taxa de Mortalidade	(1/d)

### 3. DADOS UTILIZADOS

Neste capítulo são apresentados os dados utilizados para o desenvolvimento das simulações matemáticas referentes ao RI, ao RX e ao TRV.

#### 3.1. Topobatimetria

Os dados topobatimétricos representam a morfologia dos reservatórios e definem o domínio que será modelado. Para este estudo, consideram-se as seções topobatimétricas levantadas para o projeto de engenharia. Para se obter um modelo digital do fundo do reservatório, são necessárias interpolações dos dados de cota disponíveis. Para cada trecho modelado, esse procedimento é descrito na sequência.

##### 3.1.1. Reservatório do Xingu

Existem mais de 30 seções topobatimétricas medidas disponíveis para a área do Reservatório do Xingu. A localização das seções topobatimétricas utilizadas para gerar a batimetria deste reservatório são apresentadas na Figura 10. A distribuição irregular dos pontos de profundidade medidos demanda a utilização de técnicas de interpolação para obtenção de uma representação contínua da variação da batimetria do reservatório. Para a produção do mapa batimétrico, fez-se uso de ferramentas de geoprocessamento. Além dos dados das seções topobatimétricas, também foram utilizadas cotas altimétricas do entorno do reservatório, geradas a partir de levantamento topográfico. Complementarmente, as seções topobatimétricas foram utilizadas para identificar os principais canais de escoamento do rio Xingu para que melhores resultados fossem gerados após a interpolação.

O algoritmo de interpolação usado foi o “*Topo to Raster*”, uma função do software ArcGis. Esse se mostrou um procedimento eficaz para obter o modelo digital de profundidade, sobretudo por representar a continuidade de escoamento nos canais principais, uma vez que o procedimento incorpora uma abordagem morfológica para a modelagem digital de elevação, e os algoritmos de interpolação e de execução que

acompanham a drenagem são definidos diretamente em termos de propriedades morfológicas da superfície de terreno. A Figura 11 mostra o resultado da interpolação batimétrica para o Reservatório do Xingu.

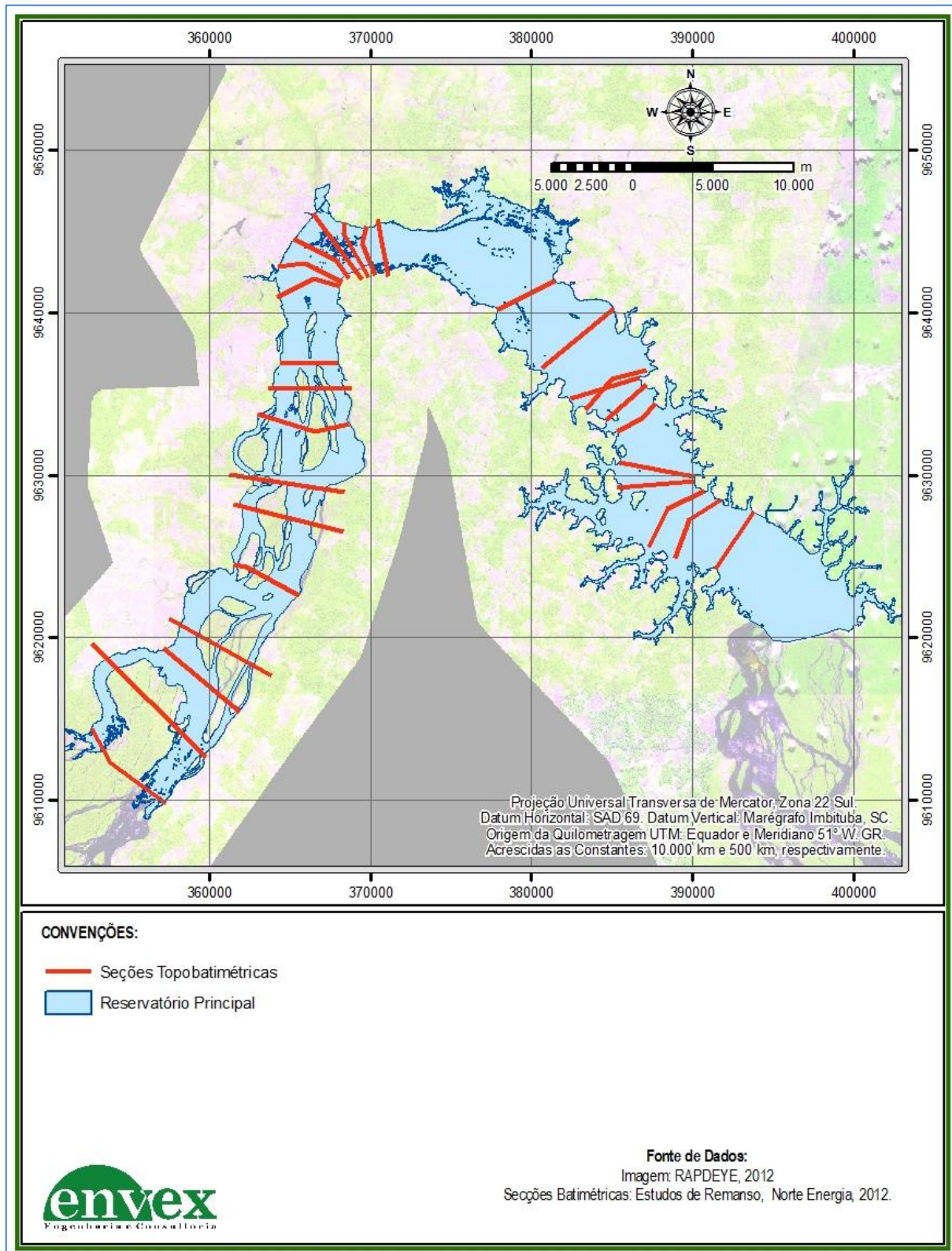


Figura 10: Seções topobatimétricas para o Reservatório do Xingu.

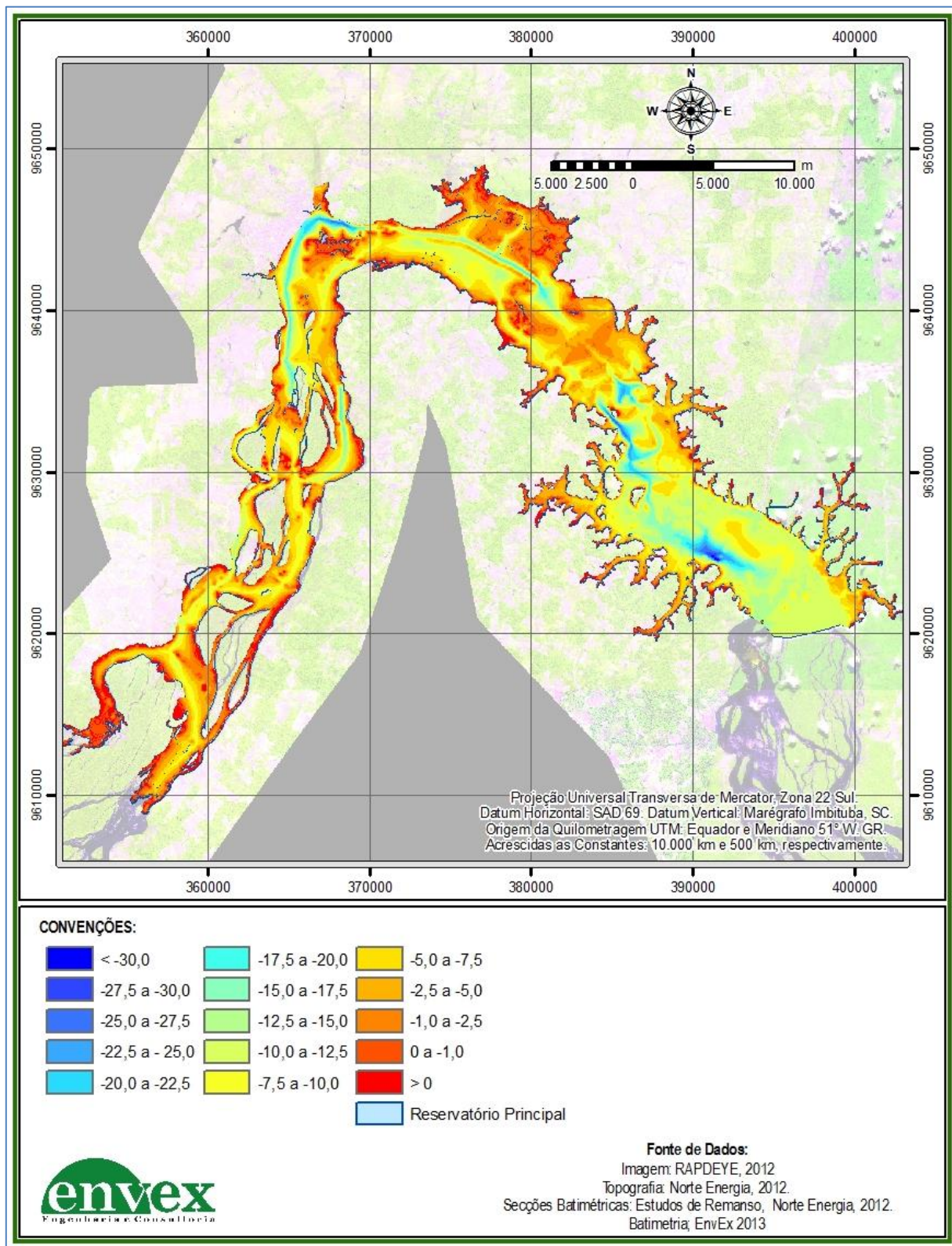


Figura 11: Batimetria do Reservatório do Xingu.

### 3.1.2. **Reservatório Intermediário**

Para o Reservatório Intermediário, o modelo digital do terreno foi gerado a partir dos dados do Projeto Básico Consolidado da UHE Belo Monte (junho/2012), Volume I, Tomo1/3 – Levantamentos e Estudos Básicos Efetuados, Anexo 1 – Cartografia. Os dados topobatimétricos foram utilizados para descrever a profundidade do reservatório. Estes incluem todos os canais dentro da área de interesse e os diques de seu contorno.

O Canal de Derivação também foi incluído no domínio, com uma seção transversal trapezoidal de base menor com largura de 210 m, por 16 km, inclinação lateral média de 1:2,5, com fundo e taludes em enrocamento, declividade longitudinal nula, com fundo na cota -75,00 m. Nos 4 km seguintes o Canal tem um alargamento de base, passando para 280 m, já na entrada do Reservatório Intermediário. A Figura 12 mostra a batimetria definida para o domínio de modelagem.

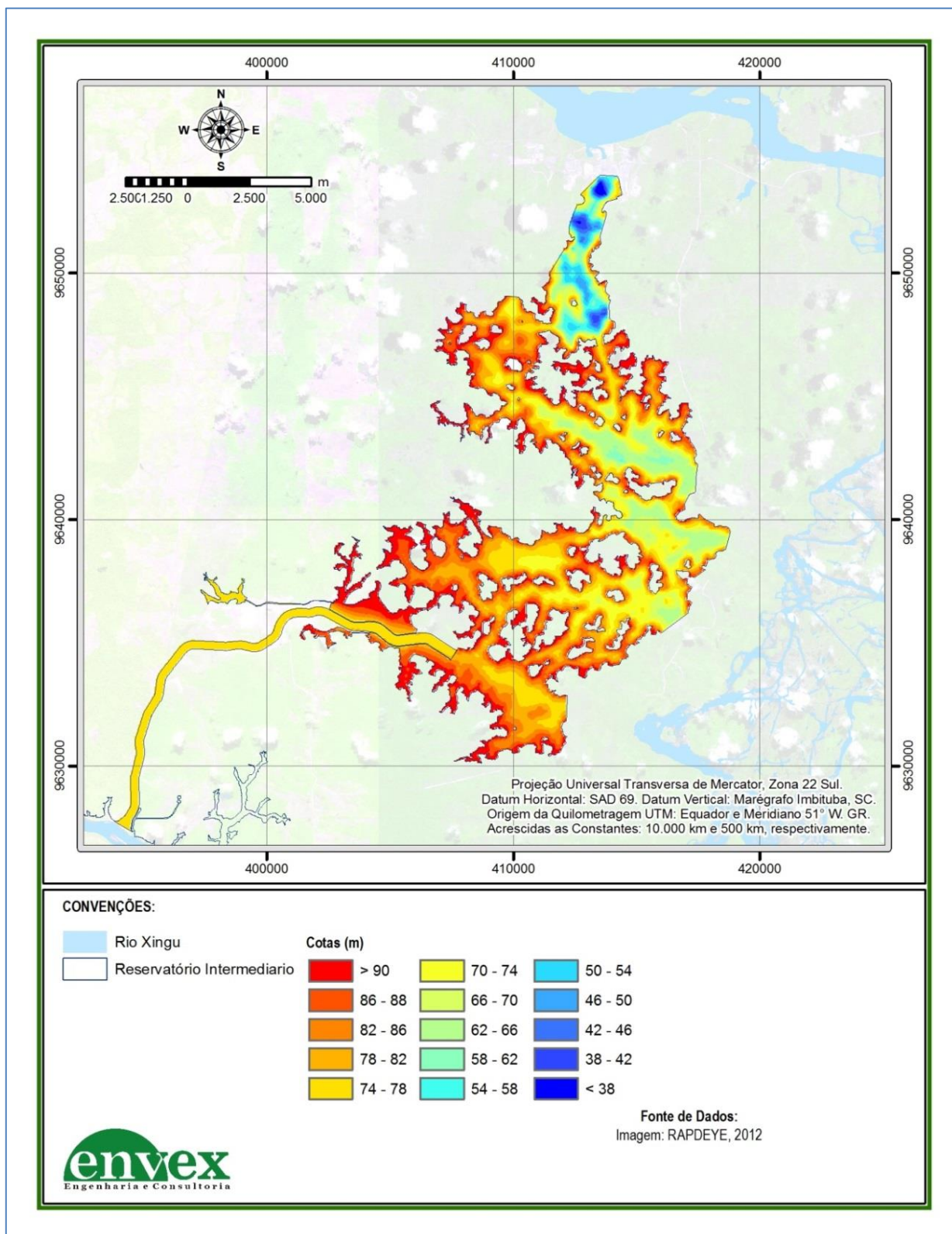


Figura 12: Batimetria do sistema do Reservatório Intermediário.



### 3.1.3. Trecho de Restituição de Vazão

Para o Trecho de Restituição de Vazão, o modelo digital do terreno foi obtido a partir de levantamentos topobatimétricos realizados durante os estudos preliminares (EIA) e durante a execução do PBA. Para tanto foram utilizadas 8 seções topobatimétricas – apresentadas na Figura 13. Estas foram nomeadas S1 a S8 – a seção S1 está localizada a montante da Casa de Força Principal da UHE Belo Monte e está sob a influência do Trecho de Vazão Reduzida (TVR); a seção S2 é a primeira seção sob a influência tanto do TVR quanto do Reservatório Intermediário.

A Figura 14 mostra as profundidades em relação ao nível de referência do IBGE, já interpoladas, a partir das seções topobatimétricas – esta é a topobatimetria utilizada na modelagem do TRV.

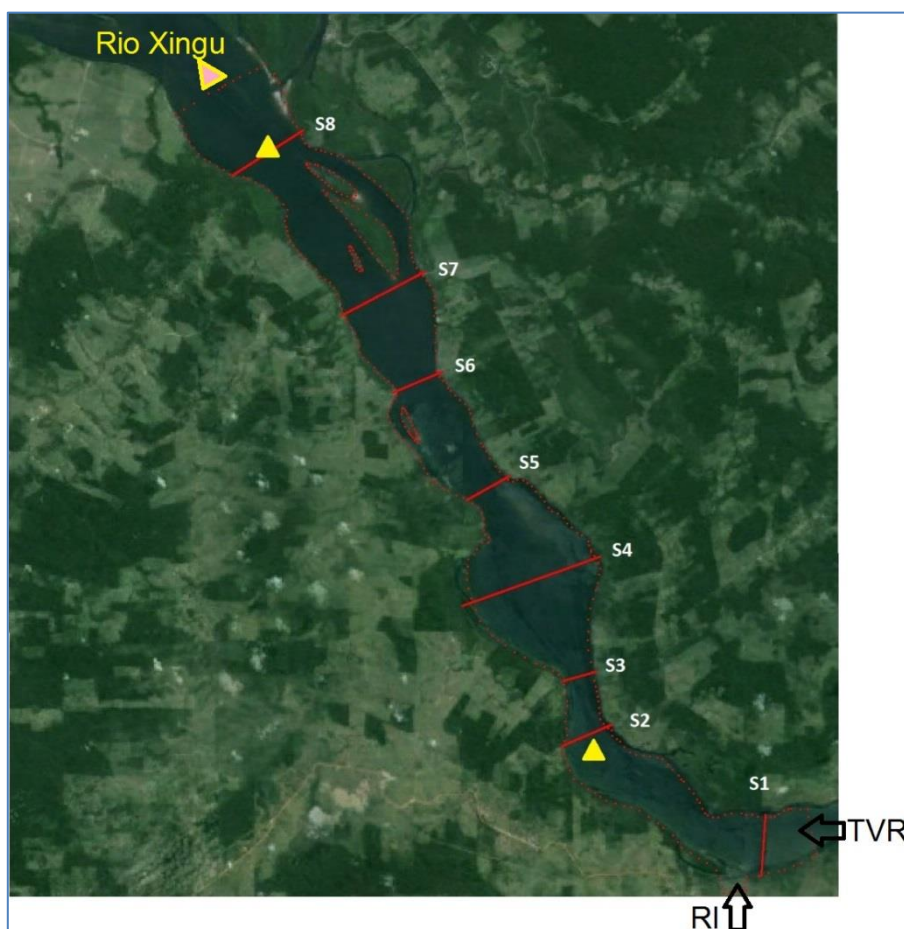
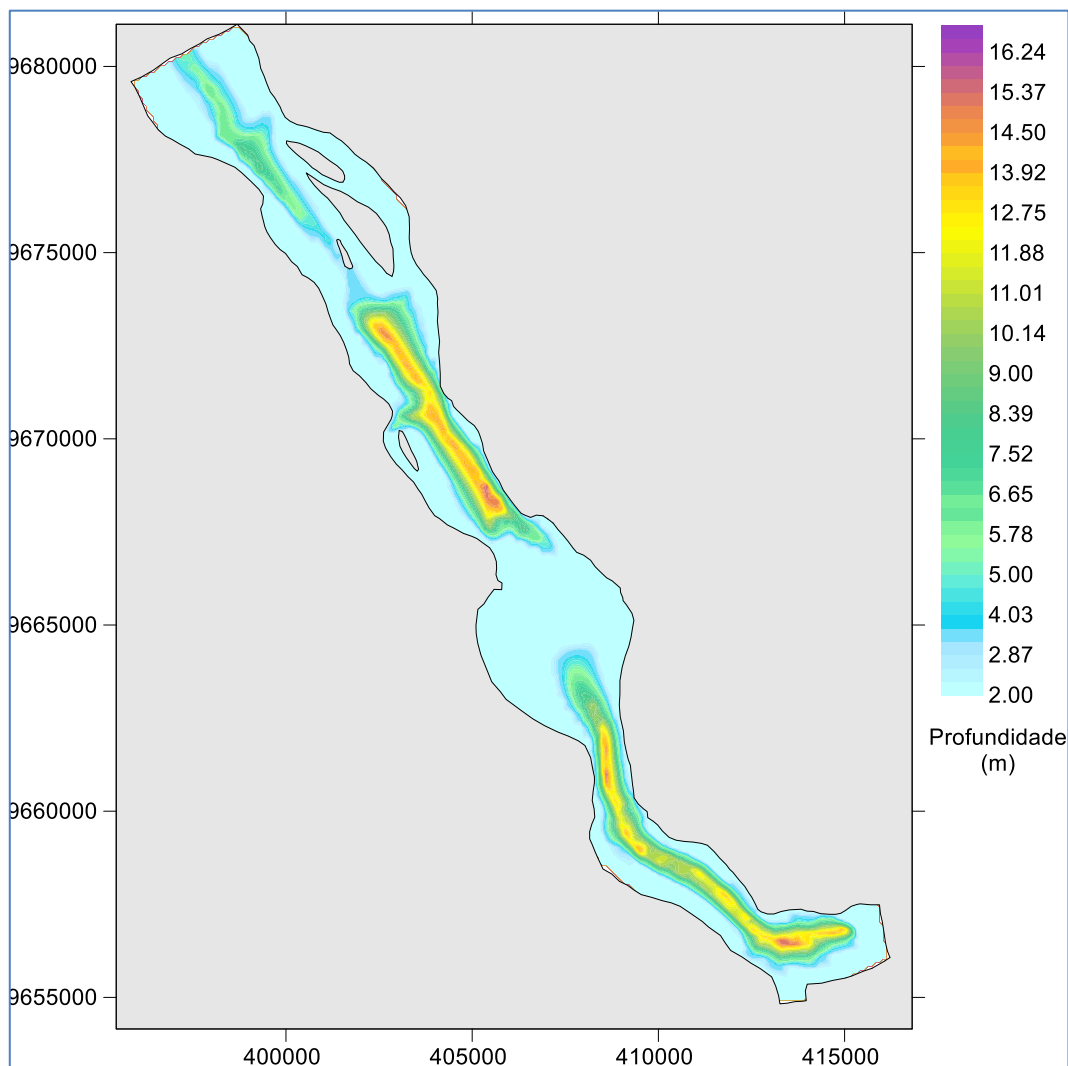


Figura 13: Seções topobatimétricas S1 a S8 levantadas no TRV e pontos notáveis (triângulos amarelos) S2 e S8.



**Figura 14: Topobatimetria utilizada nas simulações do Trecho de Restituição de Vazão (TRV).**

### 3.2. Vazões

Para realizar adequadamente as simulações, é necessário dispor de dados de vazões de todos os rios afluentes aos reservatórios, além das vazões que chegam ao Trecho de Restituição de Vazão através do RI e do Trecho de Vazão Reduzida (TVR).

A série de vazões afluentes ao RX, através do Rio Xingu, foi construída com base nas observações de vazão na estação de Altamira para o ano de 2016. Estas vazões foram apresentadas no Quadro 11.1.2 – 3 do 12º Relatório Consolidado De Andamento

do PBA e Atendimento de Condicionantes datado de julho de 2017. As vazões utilizadas como afluentes ao rio Xingu são apresentadas na Tabela 6.

Uma vez que o modelo matemático precisa de informações de vazão horárias, os valores médios mensais observados para esse período foram interpolados de forma a gerar uma série na escala de tempo necessária. As vazões médias mensais do ano de 2016 foram utilizadas por serem representativas de um ano seco e serem menores do que aquelas consideradas no hidrograma B (Resolução Nº 48 da ANA, de 28 de fevereiro de 2011) – possibilidade que deve ser considerada neste estudo. Esta série foi denominada de  $Q_{2016}$ .

Tabela 6: Vazões da estação de Altamira para o ano de 2016.

Mês	Vazão Média Mensal Rio Xingu (m <sup>3</sup> /s)
jan-16	2.442,00
fev-16	6.379,00
mar-16	7.798,00
abr-16	10.693,00
mai-16	6.127,00
jun-16	2.732,00
jul-16	1.550,00
ago-16	890,00
set-16	745,00
out-16	991,00
nov-16	1.635,44
dez-16	3725,90

Para representar a vazão efluente do RX e afluente ao TVR (Trecho de Vazão Reduzida), foi considerado o hidrograma B (apresentado na Tabela 1) – os valores de vazão do hidrograma B foram mantidos constantes ao longo de cada um dos meses da série. Esta série de vazões foi chamada de  $Q_{TVR}$ .

Considerando as vazões do hidrograma B, a vazão  $Q_{2016}$ , e as regras de operação do reservatório, foram geradas as sete séries de vazões afluentes ao RI – uma para cada cenário definido anteriormente. Os valores das vazões dessas séries foram definidos de acordo com:

$$Q_{RI} = Q_{2016} - Q_{TVR} \quad (01)$$

$$Q_{RI1} = 50 m^3 / s \quad (02)$$

$$Q_{RI2} = 100 m^3 / s \quad (03)$$

$$Q_{RI3} = 150 m^3 / s \quad (04)$$

$$Q_{RI4} = 200 m^3 / s \quad (05)$$

$$Q_{RI5} = 250 m^3 / s \quad (06)$$

$$Q_{RI6} = 300 m^3 / s \quad (07)$$

$$Q_{RI7} = 0 m^3 / s \quad (08)$$

A equação (01) é utilizada para os meses referentes ao período úmido, ou seja, janeiro a junho, e as equações de (02) a (07) são utilizadas para o período seco (julho a dezembro) – as séries de vazões para cada situação são apresentadas na Figura 17. O sétimo cenário a ser considerado nas simulações, refere-se à utilização da vazão afluyente  $Q_{RI7} = 0 m^3/s$  para o período de seca, entre os meses de julho a dezembro.

Além das vazões definidas acima, também considera-se que:

- A vazão turbinada é efluente do Reservatório Intermediário (RI), e é uma das vazões afluentes ao Trecho de Restituição de Vazão (TRV), ou seja, o trecho de jusante;
- No Trecho de Restituição de Vazão (TRV), a vazão total é composta pelas vazões efluentes do RI – a  $Q_{TURB}$  – e pela vazão efluente do RX, ou seja, a vazão do Trecho de Vazão Reduzida ( $Q_{TVR}$ ). Assim, a vazão de saída do TRV é dada pela soma das  $Q_{TURB}$  com a  $Q_{TVR}$ .

As séries de vazões horárias turbinadas (saída do RI), bem como as séries de vazões  $Q_{2016}$  (afluente ao TVR) e  $Q_{TVR}$  (saída do RX), para o período de um ano, são apresentadas na Figura 15, na Figura 16 e na Figura 17.

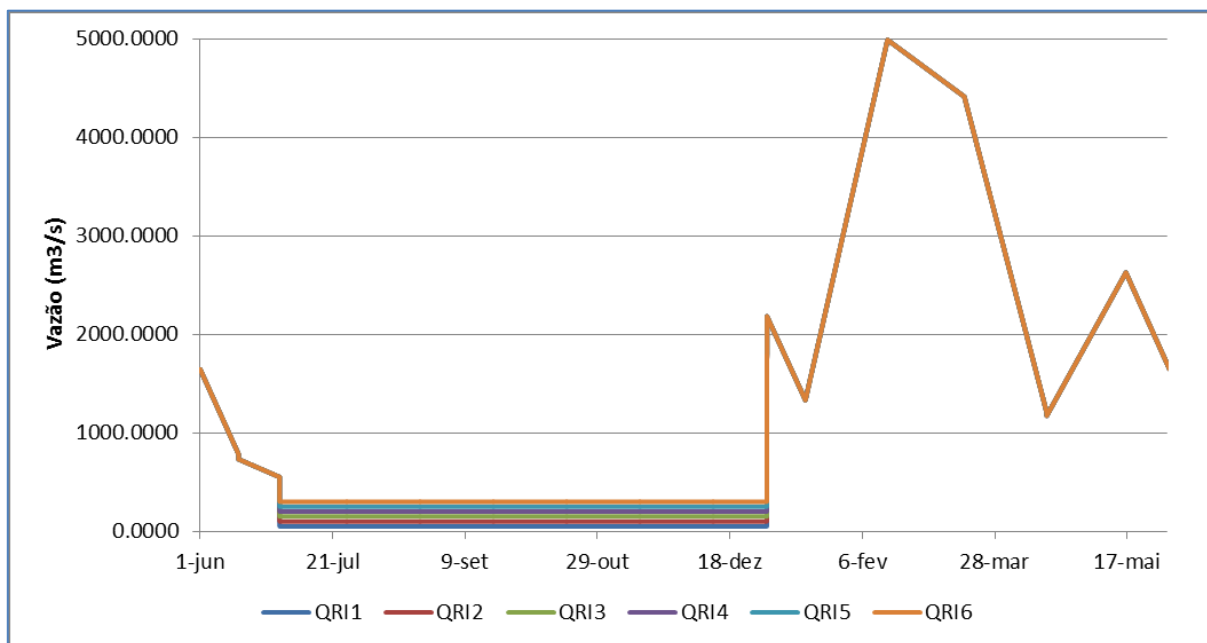


Figura 15: Séries anuais de vazões afluentes ao RI e efluentes do RX para o RI.

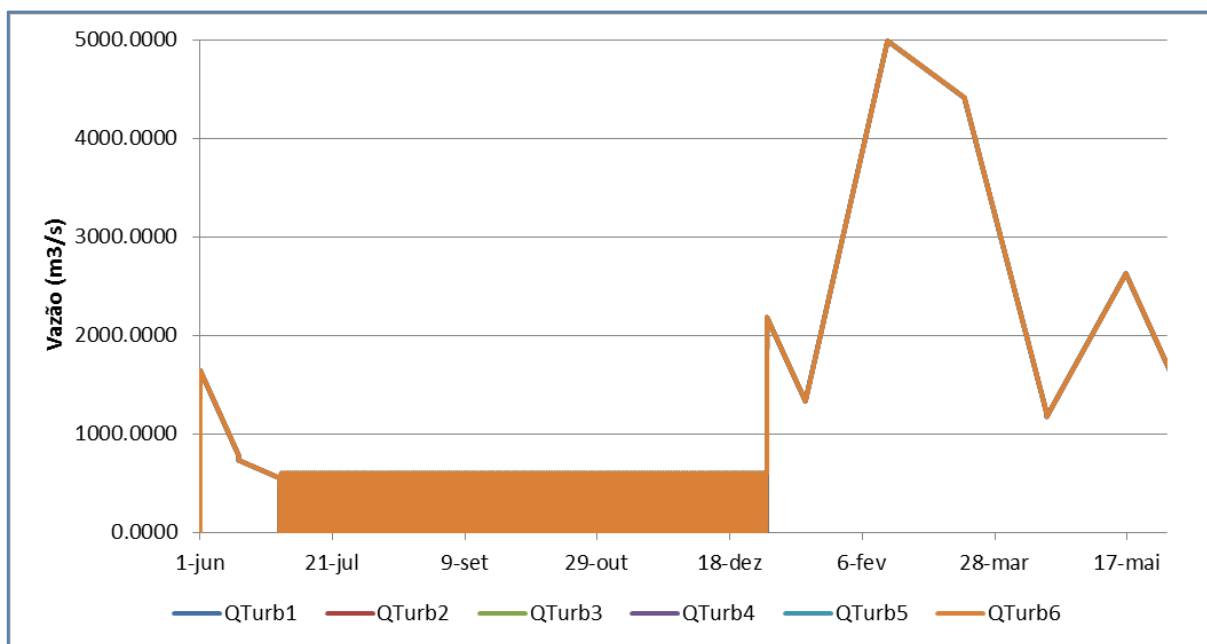
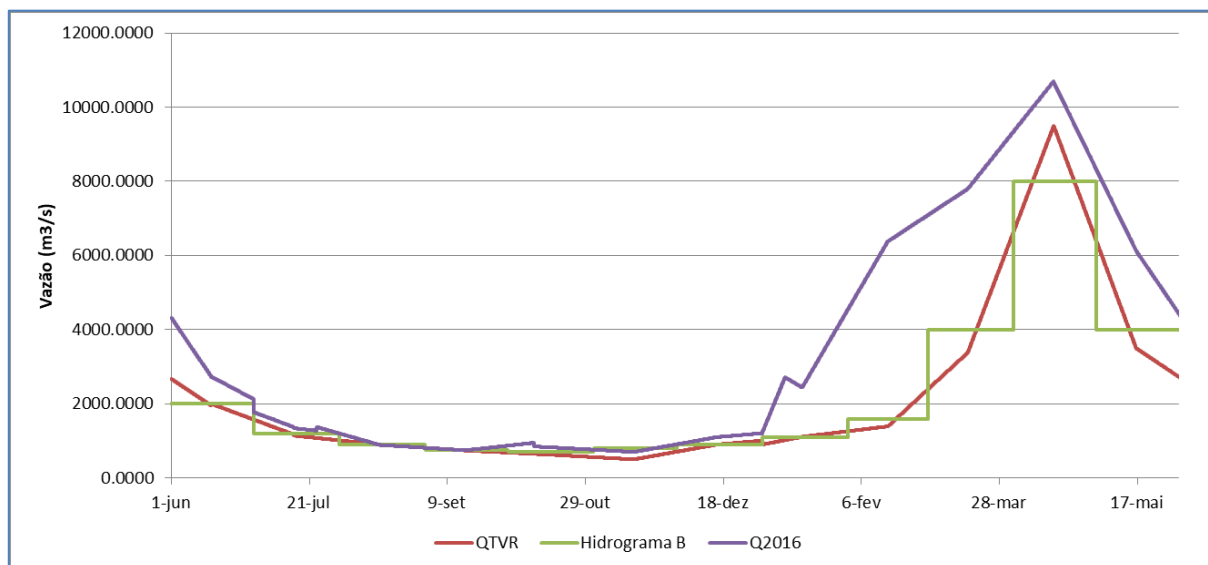


Figura 16: Séries anuais de vazões turbinadas no RI e afluentes ao TRV.



**Figura 17: Séries anuais de vazões afluentes e efluentes no TVR (e afluentes ao TRV), do Hidrograma B, e do ano de 2016.**

Para a operação de turbinamento em pulsos durante o período de estiagem, as vazões de entrada e saída do RI, para um período de 24 horas, são apresentadas na Tabela 7. Estas vazões foram definidas de acordo com os cenários a serem simulados (seção 1.3). Cabe mencionar que as vazões afluentes ao RI durante o período de seca - julho a dezembro - foram criadas considerando as mesmas vazões médias diárias das vazões turbinadas. Com isso, existe um balanço entre as vazões afluentes e efluentes ao RI, sendo que o turbinamento em pulsos foi implementado para ocorrer nas últimas horas do dia. Por exemplo, para o Cenário 1, o turbinamento ocorre às 22:00 e 23:00 horas, com vazões de 600 m<sup>3</sup>/s. Para o Cenário 2, o turbinamento, ocorre às 20:00, 21:00, 22:00 e 23:00 horas, e assim sucessivamente para o restante dos cenários.

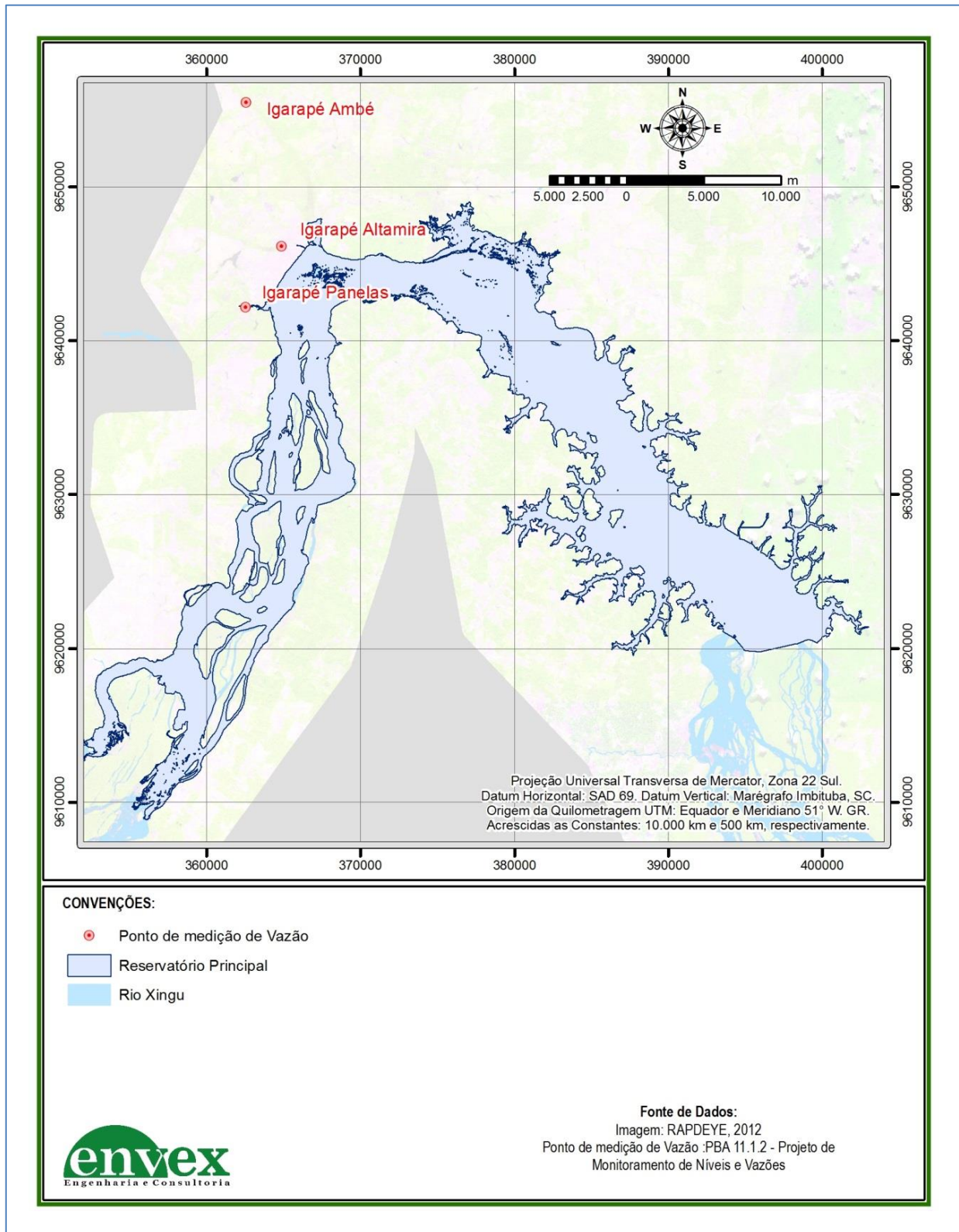
*Tabela 7: Vazões de entrada ( $Q_{RI}$ ) e saída ( $Q_{turb}$ ) do RI durante o período de estiagem para um período de 24 horas.*

Hora	$Q_{RI1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{RI2}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{RI3}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{RI4}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{RI5}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{RI6}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{turb1}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{turb2}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{turb3}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{turb4}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{turb5}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{turb6}$ (m <sup>3</sup> /s)
0:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
1:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
2:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
3:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
4:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
5:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
6:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0

Hora	Q <sub>RI1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>RI2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>RI3</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>RI4</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>RI5</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>RI6</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>turb1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>turb2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>turb3</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>turb4</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>turb5</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>turb6</sub> (m <sup>3</sup> /s)
7:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
8:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
9:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
10:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
11:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	0
12:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	600
13:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	0	600
14:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	600	600
15:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	0	600	600
16:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	600	600	600
17:00	50	100	150	200	250	300	0	0	0	600	600	600
18:00	50	100	150	200	250	300	0	0	600	600	600	600
19:00	50	100	150	200	250	300	0	0	600	600	600	600
20:00	50	100	150	200	250	300	0	600	600	600	600	600
21:00	50	100	150	200	250	300	0	600	600	600	600	600
22:00	50	100	150	200	250	300	600	600	600	600	600	600
23:00	50	100	150	200	250	300	600	600	600	600	600	600

Ainda, em termos de vazões, é necessário conhecer as vazões de afluentes menores, tanto ao RX quanto ao RI. Nesse sentido, e de acordo com estudos de modelagens já realizados anteriormente, na sequência são descritas as vazões afluentes e efluentes dos dois reservatórios.

Os tributários da região próxima à cidade de Altamira, os igarapés Altamira, Pannels e Ambé, apresentam valores medidos no contexto do PBA da UHE Belo Monte (PBA 11.1.1 - Projeto de Monitoramento Hidrossedimentológico e PBA 11.1.2 - Projeto de Monitoramento de Níveis e Vazões), em estações cuja localização pode ser observada na Figura 18. Deve-se notar que as vazões, apresentadas na Tabela 8 são pouco significativas quando comparadas com a vazão do rio Xingu. Isso também mostra que os outros tributários possuem importância ainda menor.



**Figura 18: Localização das estações de monitoramento de vazões nos igarapés.**



Tabela 8: Valores de vazão (m<sup>3</sup>/s) considerados para os Igarapés de Altamira, Panelas e Ambé.

Meses	Altamira	Panelas	Ambé
Janeiro	0,800	6,700	2,040
Fevereiro	5,200	20,000	3,100
Março	10,000	29,400	3,300
Abril	5,500	25,200	4,869
Mai	4,300	28,300	5,469
Junho	6,700	25,600	5,100
Julho	3,200	9,000	2,500
Agosto	1,400	7,500	2,402
Setembro	2,100	5,400	1,900
Outubro	0,530	3,700	1,607
Novembro	0,460	2,600	1,681
Dezembro	0,550	5,200	1,400

Como não há valores de vazões monitorados pelo PBA para todos os afluentes (apenas para os igarapés Altamira, Ambé e Panelas, os três na região de Altamira), foram utilizadas informações de estudos anteriores onde foi necessário usar o modelo SWAT (modelo chuva-vazão) para a construção de séries temporais de vazão de alguns tributários. Maiores detalhes sobre o cálculo das vazões dos tributários usando o SWAT podem ser encontrados em NORTE ENERGIA (2011). Dentre os tributários simulados com o SWAT, 32 deságuam diretamente no Reservatório do Xingu. Na Figura 19 é possível observar a localização das sub-bacias consideradas no modelo SWAT para a definição das vazões; estes valores são apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10.

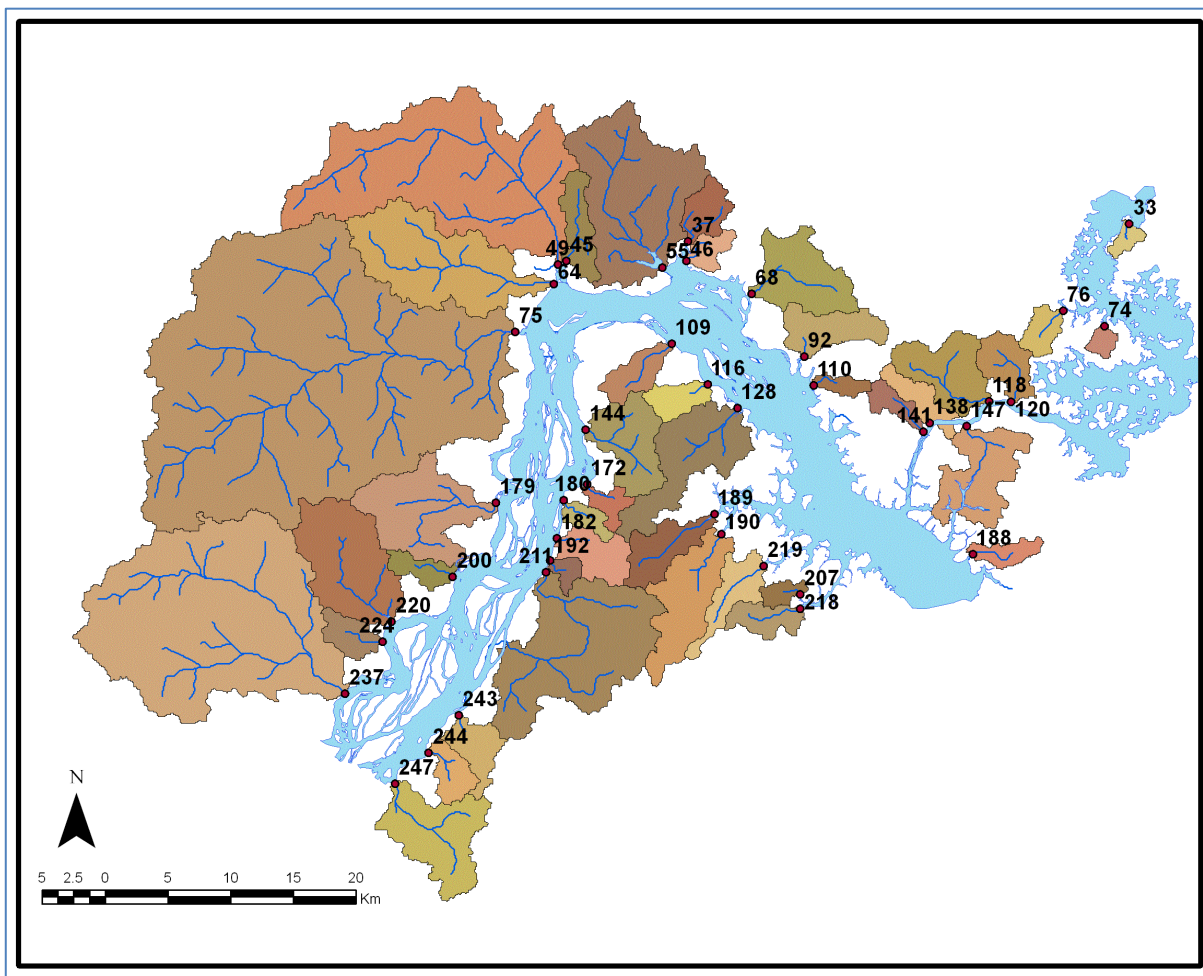


Figura 19: Bacia de contribuição considerada pelo SWAT para o Reservatório do Xingu.

Tabela 9: Valores de vazão (m<sup>3</sup>/s) de 16 sub-bacias que deságuam diretamente no Reservatório do Xingu

Meses	Sub247	Sub244	Sub243	Sub237	Sub224	Sub220	Sub218	Sub207	Sub200	Sub211	Sub219	Sub192	Sub188	Sub45	Sub46	Sub37
Janeiro	0,95	0,33	0,45	8,10	0,40	2,12	0,47	0,19	0,33	5,70	0,67	0,17	0,31	0,43	0,23	0,36
Fevereiro	1,73	0,64	0,86	15,14	0,74	3,94	0,82	0,32	0,61	10,48	1,18	0,31	0,55	0,86	0,44	0,71
Março	4,62	1,40	1,85	29,38	1,46	7,32	1,51	0,63	1,21	20,58	2,20	0,60	1,03	1,99	0,95	1,58
Abril	3,99	1,10	1,46	22,15	1,11	5,42	1,15	0,49	0,92	15,34	1,66	0,46	0,78	1,60	0,75	1,25
Mai	1,76	0,21	0,28	5,42	0,25	1,35	0,51	0,22	0,20	4,50	0,68	0,11	0,31	0,34	0,14	0,24
Junho	1,16	0,08	0,11	2,31	0,10	0,56	0,28	0,13	0,08	1,85	0,37	0,04	0,16	0,14	0,06	0,09
Julho	0,53	0,02	0,03	0,37	0,02	0,06	0,07	0,04	0,01	0,40	0,10	0,01	0,04	0,04	0,01	0,02
Agosto	0,14	0,01	0,01	0,24	0,01	0,07	0,03	0,02	0,01	0,20	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Setembro	0,05	0,00	0,01	0,26	0,01	0,09	0,03	0,01	0,01	0,18	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
Outubro	0,02	0,00	0,00	0,37	0,01	0,13	0,04	0,01	0,01	0,24	0,06	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
Novembro	0,07	0,02	0,02	1,36	0,05	0,43	0,13	0,04	0,03	0,90	0,18	0,03	0,08	0,02	0,01	0,02
Dezembro	0,36	0,12	0,16	3,71	0,17	1,03	0,27	0,10	0,13	2,59	0,37	0,08	0,17	0,14	0,08	0,13

*Tabela 10: Valores de vazão (m<sup>3</sup>/s) das outras 16 sub-bacias que deságuam diretamente no Reservatório do Xingu*

Meses	Sub182	Sub190	Sub189	Sub179	Sub180	Sub172	Sub141	Sub144	Sub138	Sub128	Sub110	Sub116	Sub92	Sub109	Sub68	Sub55
Janeiro	0.68	1.57	0.80	1.63	0.25	0.27	0.27	1.08	0.42	1.69	0.19	0.36	0.77	0.37	1.23	2.23
Fevereiro	1.24	2.83	1.46	3.14	0.45	0.49	0.46	2.02	0.75	3.14	0.35	0.68	1.45	0.74	2.27	4.60
Março	2.25	4.97	2.62	6.42	0.87	0.91	0.95	3.93	1.52	5.95	0.69	1.38	2.78	1.62	4.63	10.95
Abril	1.66	3.66	1.92	5.01	0.66	0.69	0.75	2.99	1.17	4.44	0.52	1.06	2.08	1.27	3.61	8.93
Mai	0.44	1.42	0.52	1.40	0.15	0.17	0.33	0.71	0.36	1.07	0.12	0.22	0.48	0.24	0.74	2.09
Junho	0.18	0.70	0.22	0.64	0.06	0.07	0.20	0.31	0.18	0.44	0.05	0.09	0.20	0.10	0.28	0.93
Julho	0.02	0.13	0.02	0.13	0.01	0.01	0.07	0.06	0.06	0.05	0.01	0.02	0.03	0.03	0.06	0.27
Agosto	0.03	0.09	0.03	0.06	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.08
Setembro	0.03	0.11	0.04	0.06	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.06	0.01	0.01	0.03	0.00	0.02	0.02
Outubro	0.05	0.16	0.06	0.08	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.09	0.01	0.01	0.04	0.00	0.02	0.01
Novembro	0.15	0.47	0.19	0.27	0.04	0.05	0.05	0.17	0.06	0.31	0.03	0.03	0.13	0.02	0.09	0.07
Dezembro	0.34	0.91	0.42	0.70	0.11	0.13	0.13	0.49	0.19	0.79	0.08	0.14	0.35	0.14	0.47	0.67

Para o Reservatório Intermediário, além das vazões de entrada de cada cenário e da vazão turbinada, é necessário considerar as vazões remanescentes dos igarapés interceptados pelos diques; estes valores foram obtidos em estudos realizados anteriormente, e são apresentadas na Tabela 11.

*Tabela 11: Valores de vazão remanescente dos igarapés interceptados pelos diques*

Igarapé	Dique	Q (m <sup>3</sup> /s)
Paquiçamba	28	0,7
Ticaruca	19B	0,5
Cobal	14C	0,3
Cajueiro	13	0,1
Turiá	8B	0,1

### 3.3. Parâmetros meteorológicos

O vento é um dos principais forçantes da circulação hidrodinâmica em reservatórios. Além disso, é capaz de misturar diferentes camadas de água transferindo calor entre elas. Neste sentido, o uso de séries temporais de intensidade e de direção de vento medidas favorece simulações mais realistas. Os dados de vento que serão utilizados nas simulações referem-se às medições realizadas nas estações meteorológicas de Altamira e de Pimental no período de 2012 a 2017, cuja localização é

apresentada na Figura 20. A partir dos dados medidos foram construídas séries de médias correspondentes a um ano. Inicialmente foram calculadas as médias entre os dados medidos nas duas estações, e posteriormente foram obtidas médias para cada hora e dia do ano, gerando assim uma série de um ano de dados horários.

A Figura 21 apresenta as médias diárias de velocidade do vento medidas nas estações meteorológicas de Altamira e de Pimental entre 2012 e 2017; por sua vez, a Figura 22 apresenta a série de médias horárias de velocidades do vento utilizadas nas simulações matemáticas.

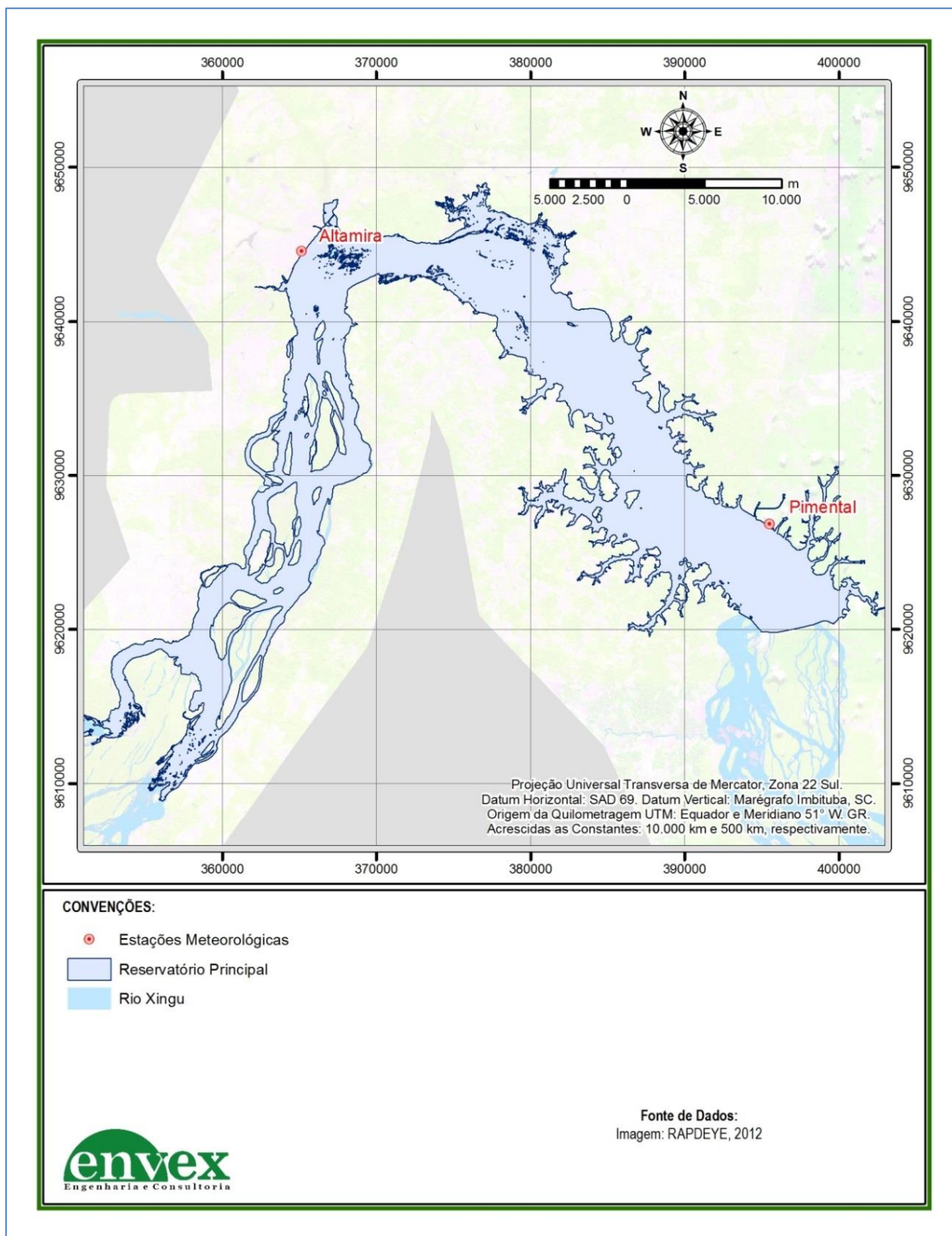
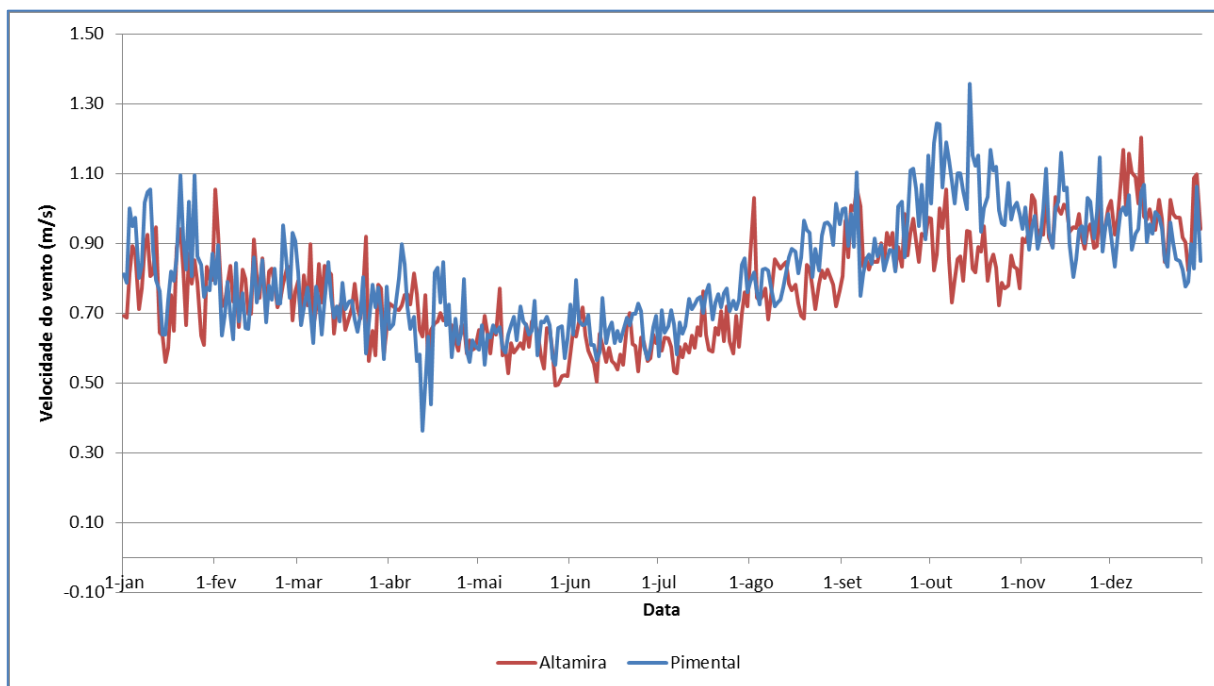
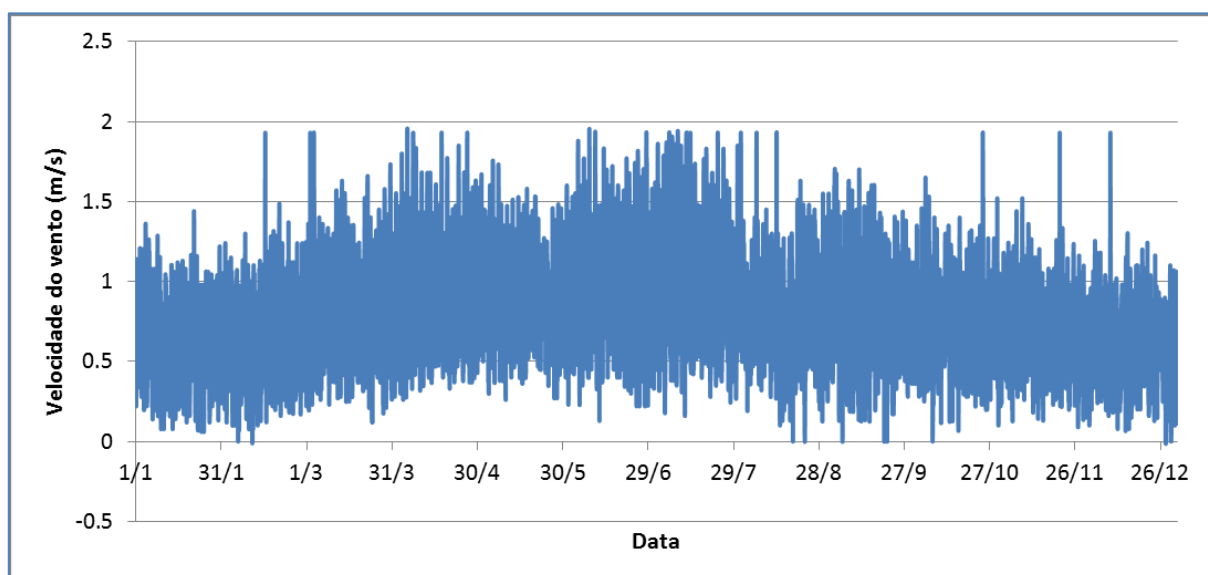


Figura 20: Localização das estações meteorológicas de Altamira e Pimental, onde foram medidos parâmetros meteorológicos (vento, temperatura do ar e umidade).



**Figura 21: Médias diárias de velocidade do vento medidas nas estações meteorológicas de Altamira e de Pimental entre 2012 e 2017.**



**Figura 22: Médias horárias entre as velocidades do vento medidas nas estações meteorológicas de Altamira e de Pimental entre 2012 e 2017.**

### 3.4. Dados de qualidade da água

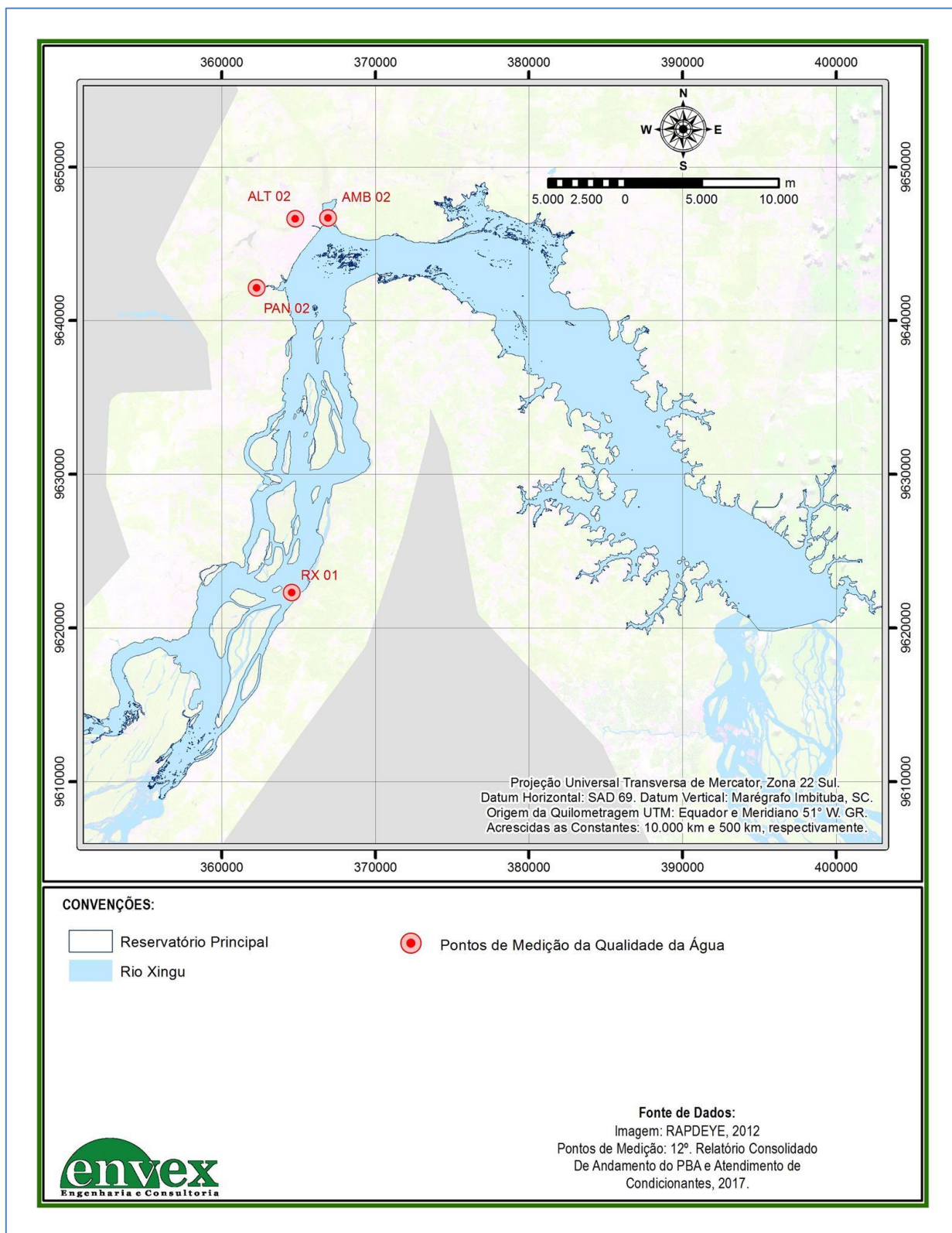
Os dados de qualidade da água necessários para gerar as condições de contorno e iniciais dos parâmetros simulados são, em sua maioria, provenientes do 12º Relatório Consolidado De Andamento do PBA e Atendimento de Condicionantes (datado de julho de 2017) - os dados apresentados neste relatório iniciam em dezembro de 2011; dados posteriores ao relatório foram fornecidos pela contratante e vão até outubro de 2017.

Salienta-se que são necessárias condições de contorno de qualidade da água para todos os pontos em que há afluência de água ao reservatório, assim os dados medidos devem ser representativos dessas regiões. Da mesma forma, a condição inicial do reservatório também deve ser representativa de toda a área do mesmo. Nesse sentido, foram considerados os pontos de medição descritos na Tabela 12, e espacializados na Figura 23 – pontos ALT 02, AMB 02, PAN 02 e RX 01. Os dados medidos nesses pontos, e utilizados nas modelagens do Reservatório do Xingu, são apresentados na Tabela 13. A forma de processamento para definição das condições de contorno e iniciais do reservatório será apresentada posteriormente, na seção 4.3.

Para as implementações das simulações para o Reservatório Intermediário e para o Trecho de Restituição de Vazão, a descrição da definição das condições iniciais e de contorno é apresentada, respectivamente, nas seções 5.3 e 6.3.

*Tabela 12: Pontos de medição de qualidade da água utilizados para a geração das condições de contorno e iniciais das simulações de qualidade da água do reservatório do Xingu.*

Ponto	Descrição do ponto	Coordenada X (SAD 69 UTM)	Coordenada Y (SAD 69 UTM)
ALT 02	Ponto localizado no Igarape Altamira, na cidade de Altamira	364918	9646170
AMB 02	Ponto localizado no Igarape Ambé, na cidade de Altamira	367145	9646750
PAN 02	Ponto localizado no Igarapé Panelas, próximo a cidade de Altamira	362587	9642191
RX 01	Ponto localizado no Rio Xingu, distante 12 km a montante da cidade de Altamira	364567	9622460



**Figura 23: Espacialização dos pontos de monitoramento de qualidade da água utilizados para geração das condições iniciais e de contorno para as simulações do Reservatório do Xingu.**



Tabela 13: Dados de qualidade da água utilizados na geração das condições iniciais e de contorno para as simulações de qualidade da água do reservatório do Xingu.

PONTO	CAMPANHA	DATA	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	OXIGENIO DISSOLVIDO (mg/L)	FOSFORO TOTAL (mg/L)	NITRATO (mg/L)	AMÔNIA (mg/L)	DBO (mg/L)	CLOROFILA-A (µg/L)
ALT 02	1	05/12/11	26,9800	1,4200	0,0639	0,0233	-	5,2500	0,1395
ALT 02	2	03/03/12	27,5400	3,5000	0,0404	0,0451	0,0337	7,4200	1,2800
ALT 02	3	13/06/12	26,5700	2,9200	0,0169	0,0681	0,0112	1,2799	0,4187
ALT 02	4	10/09/12	28,3000	2,3900	0,0143	0,0220	0,0026	1,3200	1,9800
ALT 02	5	07/11/12	27,1800	1,6200	0,0504	0,0297	0,0287	4,5800	2,2000
ALT 02	6	15/01/13	26,2300	3,5000	0,0134	0,4171	-	1,0700	0,9489
ALT 02	7	15/04/13	27,8800	3,4000	0,0256	0,3044	0,0035	0,7400	32,3198
ALT 02	8	11/07/13	27,6900	4,4000	0,0182	0,0451	0,0011	1,0400	1,6572
ALT 02	9	18/10/13	29,3100	3,7200	0,0449	0,1791	0,0273	0,8700	22,8164
ALT 02	10	10/01/14	25,7700	4,0100	0,0105	0,1030	0,0004	0,4000	1,2800
ALT 02	11	31/03/14	26,4900	1,1000	0,0368	0,1999	0,1039	1,9800	1,5400
ALT 02	12	12/07/14	25,9600	5,1100	0,0200	0,1134	0,0095	3,2900	0,6700
ALT 02	13	03/10/14	27,7300	4,3100	0,0148	0,1464	0,0239	1,5700	0,0700
ALT 02	14	13/01/15	25,9100	3,6500	0,0284	0,1668	0,0297	0,5500	0,9300
ALT 02	15	08/04/15	26,2700	5,4200	0,0758	0,2023	0,0256	0,3100	1,2000
ALT 02	16	06/07/15	26,1000	4,9700	0,0939	0,1173	0,0058	0,5192	5,3000
ALT 02	17	06/10/15	28,2100	3,7800	0,0375	0,4455	0,1005	1,4400	5,2300
ALT 02	18	20/01/16	26,6900	3,8600	0,0330	0,0108	0,2975	1,5100	0,9100
ALT 02	19	07/04/16	27,1000	3,7300	0,0325	0,0413	0,2978	2,7700	10,4700
ALT 02	20	29/06/16	26,6600	4,6800	0,0323	0,3899	0,0897	0,7900	2,0900
ALT 02	21	04/10/16	27,2000	3,5900	0,0319	0,0330	0,2124	0,0900	2,2800
ALT 02	22	25/01/17	26,9100	5,9000	0,0392	0,0283	0,2709	1,6300	0,0000
ALT 02	23	26/04/17	30,9000	2,5900	0,0209	0,1870	0,1176	0,1100	1,5200
ALT 02	24	15/07/17	27,2000	3,8900	0,0221	0,0864	0,1060	0,9100	5,1000
ALT 02	24	15/07/17	-	-	-	-	-	-	-
ALT 02	24	15/07/17	-	-	-	-	-	-	-
ALT 02	25	20/10/17	27,5000	4,9900	0,0137	0,1470	0,1998	0,4300	2,9700
ALT 02	25	20/10/17	-	-	-	-	-	-	-
ALT 02	25	20/10/17	-	-	-	-	-	-	-
AMB 02	1	05/12/11	27,2000	5,3600	0,0441	0,0080	0,0044	3,7800	0,0797
AMB 02	2	03/03/12	27,7200	4,7500	0,0207	0,2608	0,0027	4,1200	1,1500
AMB 02	3	13/06/12	26,4500	4,8100	0,0131	0,0325	0,0421	0,5940	0,2372
AMB 02	4	10/09/12	27,1500	6,3500	0,0047	0,0075	-	0,8600	0,9500
AMB 02	5	07/11/12	27,9300	6,0700	0,0767	0,0141	0,0028	1,6500	2,6000

PONTO	CAMPANHA	DATA	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	OXIGÊNIO DISSOLVIDO (mg/L)	FOSFORO TOTAL (mg/L)	NITRATO (mg/L)	AMÔNIA (mg/L)	DBO (mg/L)	CLOROFILA-A (µg/L)
AMB 02	6	15/01/13	26,4300	5,5600	0,0039	0,1301	-	0,2500	0,6698
AMB 02	7	15/04/13	27,5800	2,0100	0,0353	0,0785	0,0506	1,4400	1,5002
AMB 02	8	11/07/13	27,3700	5,2900	0,0134	0,2608	0,0086	0,2400	0,7944
AMB 02	9	18/10/13	27,9300	6,2000	0,0311	0,0270	0,0408	0,8800	1,8607
AMB 02	10	10/01/14	26,1900	5,2400	0,0065	0,0063	-	0,7200	0,9100
AMB 02	11	31/03/14	27,3000	0,5500	0,0380	0,0143	0,1058	1,9800	10,5600
AMB 02	12	12/07/14	25,8700	5,8800	0,0095	0,1070	0,0111	1,1400	0,3000
AMB 02	13	03/10/14	27,8600	6,9600	0,0348	0,0407	0,0438	0,2800	1,1200
AMB 02	14	13/01/15	26,7600	6,3600	0,0157	0,0242	0,0105	0,2300	0,9500
AMB 02	15	14/04/15	26,4800	3,2000	0,0134	0,0420	0,0035	0,5900	2,7000
AMB 02	16	06/07/15	26,7400	5,3600	0,0392	0,0850	0,0895	0,3303	3,2000
AMB 02	17	06/10/15	27,5000	6,2100	0,0233	0,1042	0,1597	0,9500	1,1400
AMB 02	18	20/01/16	26,5400	4,5400	0,0124	0,0123	0,0144	0,3800	1,0000
AMB 02	19	07/04/16	27,8500	2,3400	0,0199	0,0045	0,1964	3,6000	6,0000
AMB 02	20	29/06/16	29,7500	4,6800	0,0199	0,0074	0,1682	1,2300	4,1500
AMB 02	21	04/10/16	26,7600	4,5000	0,0110	0,0032	0,1851	1,0300	3,5300
AMB 02	22	25/01/17	27,5000	6,3000	0,0116	0,0064	0,1330	0,0500	0,0000
AMB 02	23	26/04/17	31,3000	4,6100	0,0132	0,0348	0,0717	0,1200	7,8800
AMB 02	24	15/07/17	31,9000	4,0700	0,0246	0,0743	0,1000	0,4600	5,1000
AMB 02	24	15/07/17	-	-	-	-	-	-	-
AMB 02	24	15/07/17	-	-	-	-	-	-	-
AMB 02	25	20/10/17	28,5000	5,4200	0,0118	0,0306	0,1492	0,3400	4,5100
AMB 02	25	20/10/17	-	-	-	-	-	-	-
AMB 02	25	20/10/17	-	-	-	-	-	-	-
PAN 02	1	05/12/11	27,3600	6,3000	0,0504	0,0140	0,0031	4,1000	0,0349
PAN 02	2	03/03/12	26,4200	4,2900	0,0135	0,0764	0,0048	5,1600	2,0800
PAN 02	3	13/06/12	26,7500	6,4700	0,0154	0,0728	0,0114	0,5839	1,2280
PAN 02	4	10/09/12	27,5500	6,9300	0,0097	0,1198	0,0028	2,6000	1,7300
PAN 02	5	07/11/12	28,2200	5,9900	0,0473	0,1213	0,0013	0,5700	3,4000
PAN 02	6	15/01/13	26,2000	6,3800	0,0083	0,4261	-	1,5600	1,8506
PAN 02	7	15/04/13	30,9900	4,0300	0,0215	0,0295	0,0049	0,6500	1,5541
PAN 02	8	11/07/13	26,7900	5,8900	0,0264	0,0764	-	0,4400	2,3125
PAN 02	9	18/10/13	27,4700	7,1900	0,0631	0,1298	0,0432	0,9600	10,8595
PAN 02	10	10/01/14	26,0600	6,8100	0,0264	0,1183	-	0,9900	0,8700
PAN 02	11	31/03/14	26,5700	3,4400	0,0293	0,0358	0,0218	1,7700	2,6700
PAN 02	12	12/07/14	26,4100	6,9000	0,0251	0,1381	0,0075	0,3800	1,1200

PONTO	CAMPANHA	DATA	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	OXIGÊNIO DISSOLVIDO (mg/L)	FOSFORO TOTAL (mg/L)	NITRATO (mg/L)	AMÔNIA (mg/L)	DBO (mg/L)	CLOROFILA-A (µg/L)
PAN 02	13	03/10/14	27,9100	7,0500	0,0249	0,1159	0,0075	1,6100	1,4200
PAN 02	14	13/01/15	24,4300	7,1700	0,0455	0,1251	0,0509	0,6700	0,1200
PAN 02	15	14/04/15	26,4300	4,4000	0,0620	0,0228	-	0,6800	5,4000
PAN 02	16	06/07/15	26,9000	6,5100	0,0859	0,0490	0,0032	0,5426	2,9000
PAN 02	17	06/10/15	27,1900	7,2400	0,0187	0,2041	0,2242	1,3600	2,8900
PAN 02	18	20/01/16	26,7600	7,0600	0,0164	0,0670	0,0107	0,6400	1,1200
PAN 02	19	07/04/16	26,4600	7,7300	0,0153	0,0255	0,1007	1,5000	0,1400
PAN 02	20	29/06/16	26,1300	5,9800	0,0257	0,0037	0,1994	0,0900	0,0500
PAN 02	21	04/10/16	27,9700	4,5100	0,0170	0,0567	0,1113	1,0200	2,7900
PAN 02	22	25/01/17	26,5000	5,1000	0,0282	0,0588	0,0811	2,4100	-
PAN 02	23	23/04/17	27,2000	4,0700	0,0081	0,0284	0,0391	0,5900	-
PAN 02	24	15/07/17	26,8000	4,2600	0,0180	0,0518	0,0440	0,6700	4,0000
PAN 02	24	15/07/17	-	-	-	-	-	-	-
PAN 02	24	15/07/17	-	-	-	-	-	-	-
PAN 02	25	20/10/17	27,5000	5,7900	0,0113	0,0747	0,1113	0,1400	2,1200
PAN 02	25	20/10/17	-	-	-	-	-	-	-
PAN 02	25	20/10/17	-	-	-	-	-	-	-
RX 01	1	29/11/11	30,7600	6,6000	0,0570	0,0106	0,0061	3,9900	21,2953
RX 01	2	03/03/12	27,3800	6,6000	0,0281	0,0436	0,0027	3,2600	6,2000
RX 01	3	13/06/12	30,2800	7,2000	0,0827	0,0209	0,0068	0,4333	16,9135
RX 01	4	08/09/12	31,4900	7,7800	0,0246	0,0019	-	0,5000	4,1000
RX 01	5	07/11/12	30,8000	6,8700	0,0573	0,0083	0,0096	0,4000	8,0000
RX 01	7	15/04/13	27,9000	5,2200	0,0339	0,1192	0,0009	0,7400	1,1164
RX 01	8	11/07/13	30,2300	6,3900	0,0222	0,0436	0,0337	0,3900	6,1123
RX 01	9	16/10/13	30,1300	7,6600	0,0821	0,0189	0,0002	1,5900	3,1050
RX 01	10	10/01/14	29,0000	6,9500	0,0313	0,0726	0,0139	1,0000	12,1600
RX 01	11	31/03/14	27,2900	5,3500	0,0304	0,1542	0,0212	1,8500	2,8200
RX 01	12	09/07/14	29,9100	7,2800	0,0192	0,1065	0,0061	0,2400	8,5100
RX 01	13	03/10/14	30,4300	7,6600	0,0407	0,0244	0,0099	1,2300	5,0900
RX 01	14	10/01/15	30,0900	7,4800	0,0440	0,0143	0,0171	2,1100	5,1200
RX 01	15	14/04/15	28,5200	6,7400	0,0223	0,0123	0,0181	0,7300	7,2000
RX 01	16	09/07/15	31,0400	7,5800	0,0410	0,0145	0,0050	0,4483	4,8000
RX 01	17	09/10/15	30,1900	7,6500	0,0193	0,0052	0,0069	0,6100	1,0600
RX 01	18	15/01/16	28,0400	7,4500	0,0166	0,1266	0,0520	0,2700	6,3400
RX 01	19	07/04/16	29,0800	6,3500	0,0206	0,2105	0,0599	0,0800	10,3500
RX 01	20	28/06/16	30,8200	7,1000	0,0289	0,0030	0,0695	1,3700	5,4600

PONTO	CAMPANHA	DATA	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	OXIGENIO DISSOLVIDO (mg/L)	FOSFORO TOTAL (mg/L)	NITRATO (mg/L)	AMÔNIA (mg/L)	DBO (mg/L)	CLOROFILA-A (µg/L)
RX 01	21	06/10/16	30,2300	7,3300	0,0048	0,1095	0,0497	0,4800	3,6400
RX 01	22	24/01/17	28,1400	7,0000	0,0427	0,2086	0,0638	1,0600	13,0500
RX 01	22	24/01/17	28,1300	6,9100	0,0314	0,2320	0,0671	-	12,9600
RX 01	23	23/04/17	28,3000	6,2600	0,0178	0,1240	0,0457	1,7400	9,7100
RX 01	23	23/04/17	27,4000	6,1000	0,0260	0,2203	0,0655	-	10,2000
RX 01	24	14/07/17	30,9000	6,1800	0,0205	0,0074	0,0336	1,2500	7,6000
RX 01	24	14/07/17	-	-	-	-	-	-	-
RX 01	24	14/07/17	30,6000	6,1500	0,0180	0,0125	0,0471	0,0000	7,1000
RX 01	25	16/10/17	32,6000	5,4400	0,0138	0,1316	0,0452	0,2000	3,3200
RX 01	25	16/10/17	-	-	-	-	-	-	-
RX 01	25	16/10/17	-	-	-	-	-	-	-

## 4. MODELAGENS MATEMÁTICAS DO RESERVATÓRIO DO XINGU (RX)

Para se conseguir simular as condições do RI, são necessários os dados provenientes do RX como condições de contorno para as simulações de qualidade da água do Reservatório Intermediário. Isso se deve ao fato de que toda a água afluenta ao Reservatório Intermediário é proveniente do RX.

Na sequência são apresentadas as formas de implementação, bem como os resultados para as simulações de hidrodinâmica e de qualidade da água do Reservatório do Xingu.

### 4.1. Implementação das simulações de hidrodinâmica

O domínio de interesse de modelagem cobre a área do Reservatório do Xingu até a sua barragem e o Canal de Derivação; este é apresentado na Figura 24. A implementação do modelo para as simulações de hidrodinâmica seguiu as etapas descritas abaixo:

- Discretização do domínio de modelagem: a partir do contorno do reservatório, foi criada a malha de elementos finitos a ser utilizada nas modelagens com o SisBaHiA<sup>®</sup>; esta é apresentada na Figura 25. A malha de elementos finitos é composta por 1262 elementos, totalizando 6126 nós;
- Para as simulações, uma informação fundamental é a batimetria do fundo do reservatório. Para o Reservatório do Xingu, a batimetria, bem como sua forma de obtenção, foi apresentada na seção 3.1.1.
- Definição das condições de contorno – ou seja, vazões de entrada e saída do reservatório – de acordo com cada cenário de simulação conforme apresentado na seção 3.2. Como vazões afluentes foram utilizadas as vazões  $Q_{2016}$  (afluente através do Rio Xingu), as vazões dos igarapés Altamira, Panelas e Ambé, além daquelas apresentadas na Tabela 9 e na Tabela 10. Como vazões efluentes, foram consideradas as saídas para o Trecho de Vazão Reduzida (TVR) – a  $Q_{TVR}$ , e a saída para o Reservatório Intermediário (RI) –  $Q_{RI}$ , definidas para cada um dos cenários de simulação;
- Considerando os objetivos das simulações, estas se iniciam no dia 01 de junho, período em que as vazões começam a diminuir (conforme o Hidrograma B - Tabela 1);

- Todas as simulações foram iniciadas considerando que o reservatório estava cheio, ou seja, com elevação aproximada de 97,0 m;
- As simulações foram realizadas para um período de 12 meses, considerando as vazões do Rio Xingu medidas durante o ano de 2016 – embora os anos de 2016 e 2017 tenham apresentado vazões abaixo das médias históricas no período de estiagem, as vazões do ano de 2016 foram escolhidas por terem sido menores do que médias históricas em quase todos os meses;
- Foram realizadas simulações para os 7 cenários definidos na seção 1.3.

Na próxima seção são apresentados os resultados obtidos para a hidrodinâmica do reservatório.

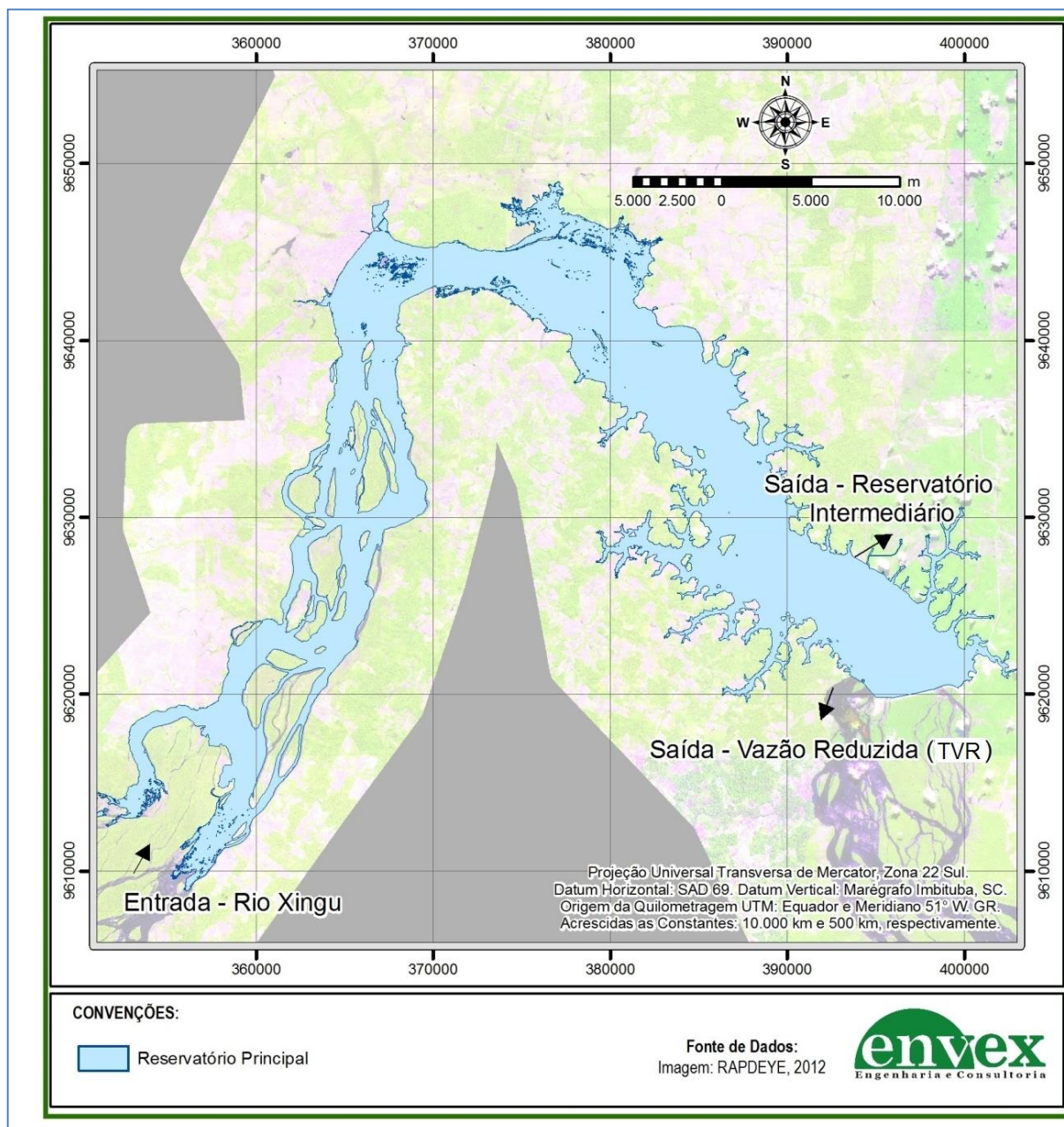
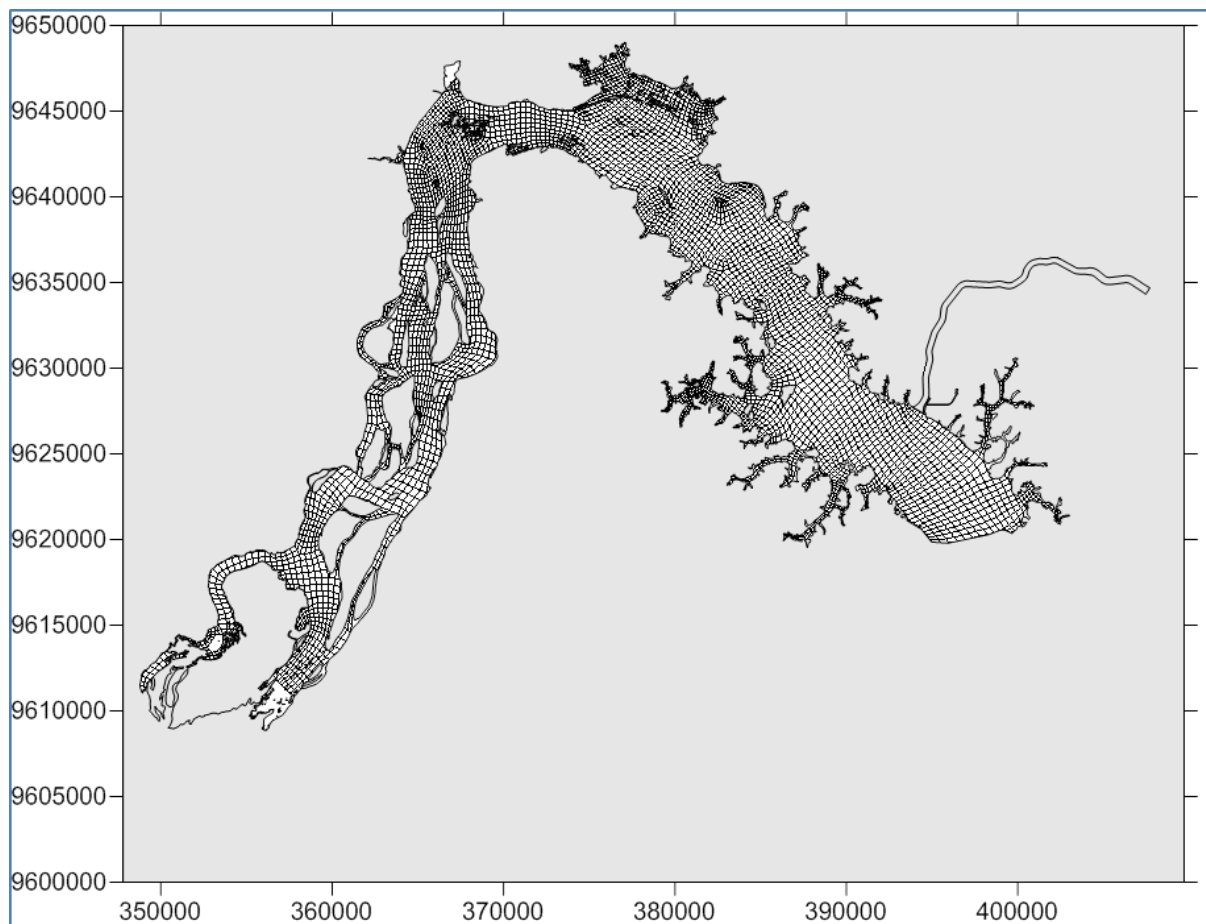


Figura 24: Domínio de modelagem para o Reservatório do Xingu.



**Figura 25 – Malha do Reservatório do Xingu.**

#### **4.2. Resultados das simulações de hidrodinâmica**

Conforme descrito anteriormente, foram simulados 7 cenários de hidrodinâmica (descritos na seção 1.3) considerando um período de um ano, com início das simulações em 01 de junho, e com o reservatório cheio.

Dentre as possibilidades de apresentação de resultados da modelagem da hidrodinâmica do reservatório estão as distribuições espaciais das velocidades de corrente e de elevação do nível d'água, além de séries temporais das variáveis simuladas.

Nesse sentido, da Figura 26 até a Figura 32 são apresentadas as distribuições espaciais do nível d'água respectivamente para os cenários 1 a 7 no período correspondente à menor vazão afluyente ao reservatório (período de estiagem), ou seja,



no dia 15 de setembro – quando ocorre a menor vazão afluente ao Xingu na série considerada. A comparação entre as distribuições espaciais nos diferentes cenários permite observar diferenças sutis de elevação a jusante de Altamira. As diferenças são da ordem de poucos centímetros (menos de 10 cm, quando comparados os cenários 6 e 7 – maior vazão efluente ao RI e nenhuma vazão efluente ao RI) e afetam uma região maior conforme aumenta a vazão efluente para o Reservatório Intermediário. De acordo com as simulações, as menores elevações são maiores do que 95,90 m.

Os campos de velocidade de corrente correspondentes ao período de menor vazão ou de estiagem (15 de setembro), são apresentados da Figura 33 até a Figura 39. Como esperado, observam-se velocidades menores nas regiões mais profundas (próximas à barragem); velocidades maiores são observadas a montante de Altamira, onde as profundidades são menores e os canais do reservatório são mais estreitos. A comparação entre os cenários permite observar diferenças sutis de velocidades de corrente, da ordem de poucos centímetros, nas regiões mais profundas. As maiores velocidades de corrente observadas são da ordem de 0,25 m/s, enquanto as menores se aproximam de zero em áreas mais estagnadas devido à morfologia local. É importante observar que a estiagem considerada é um período significativamente crítico; nesse período as velocidades são menores principalmente nas áreas periféricas do reservatório. É possível que algumas dessas áreas não estejam completamente alagadas ou então as profundidades fiquem bem menores do que nos demais períodos. Em locais com baixas velocidades de corrente, a ação do vento ganha importância, principalmente no cálculo da taxa de reaeração do sistema.

Nas entradas dos afluentes as velocidades apresentam-se um pouco maiores em função da entrada de água. Em todas as situações é possível observar, no canal principal do reservatório, que a velocidade diminui de montante para jusante, com pequenas acelerações em algumas regiões.

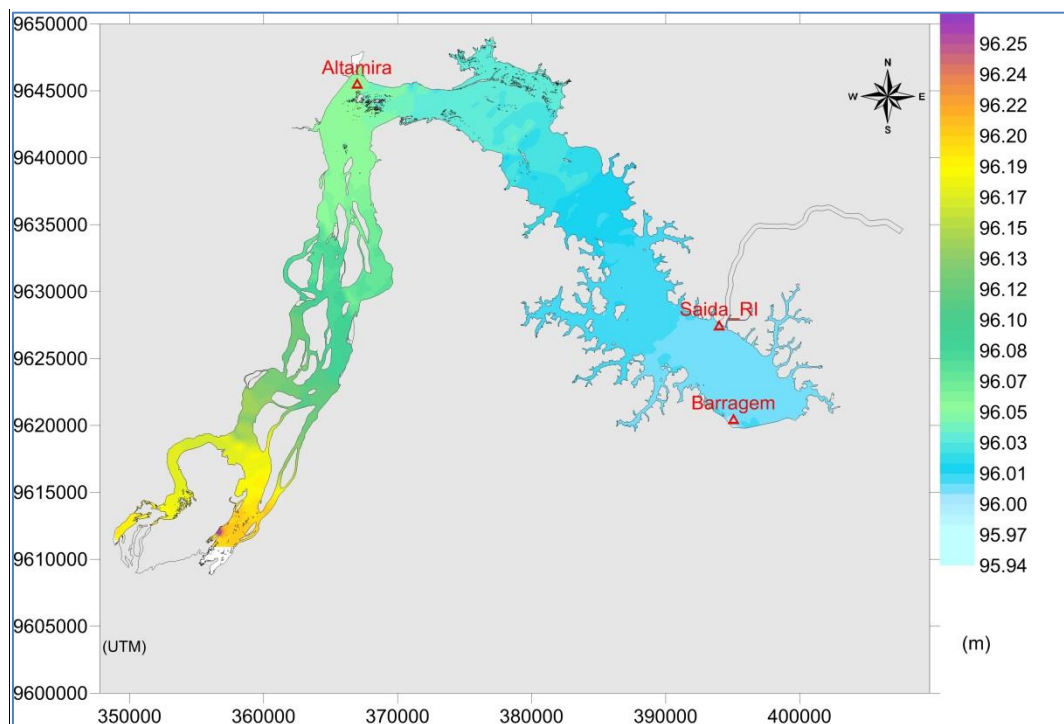


Figura 26: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.

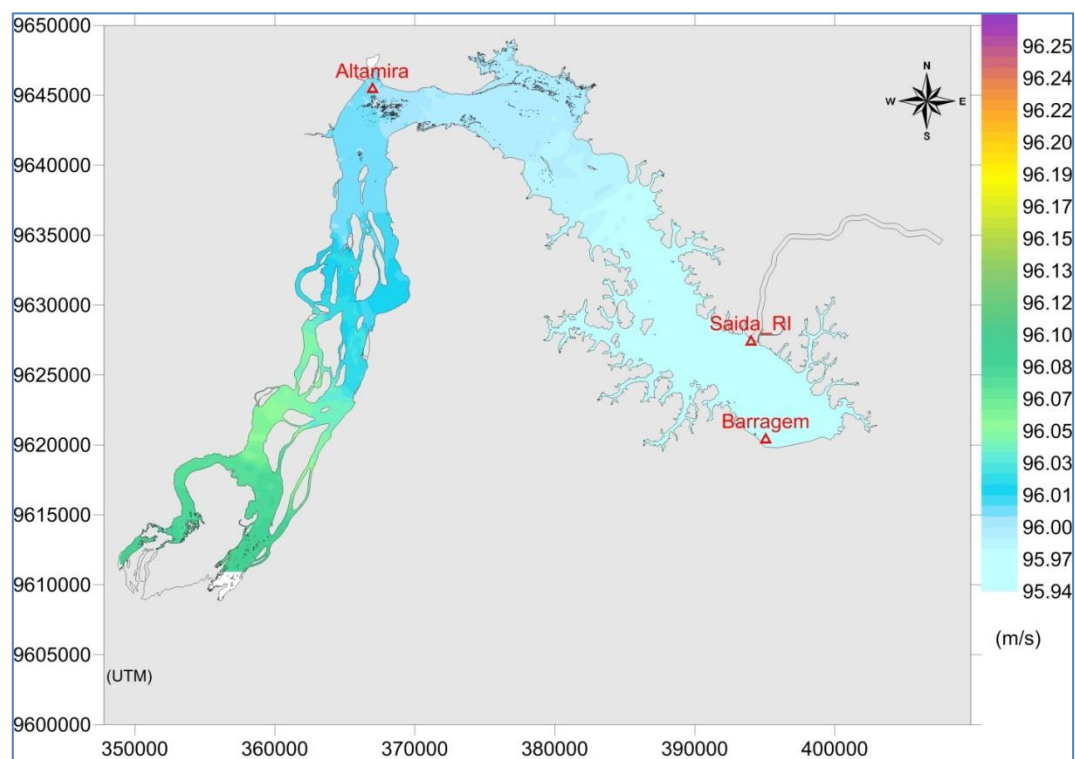
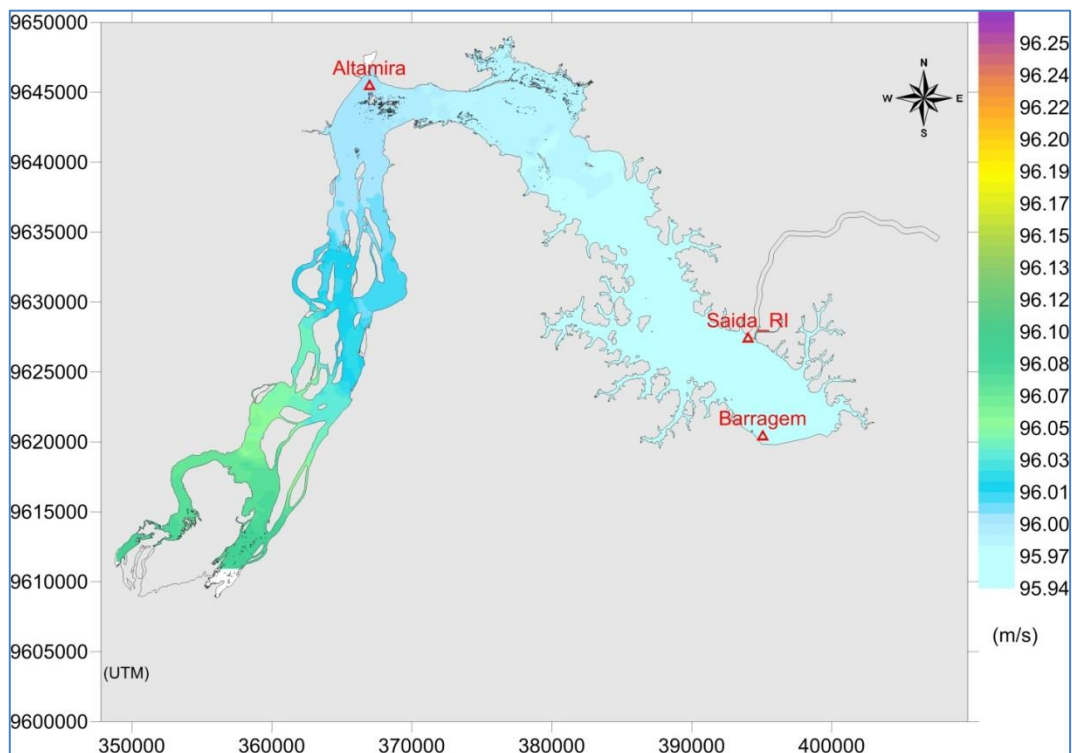
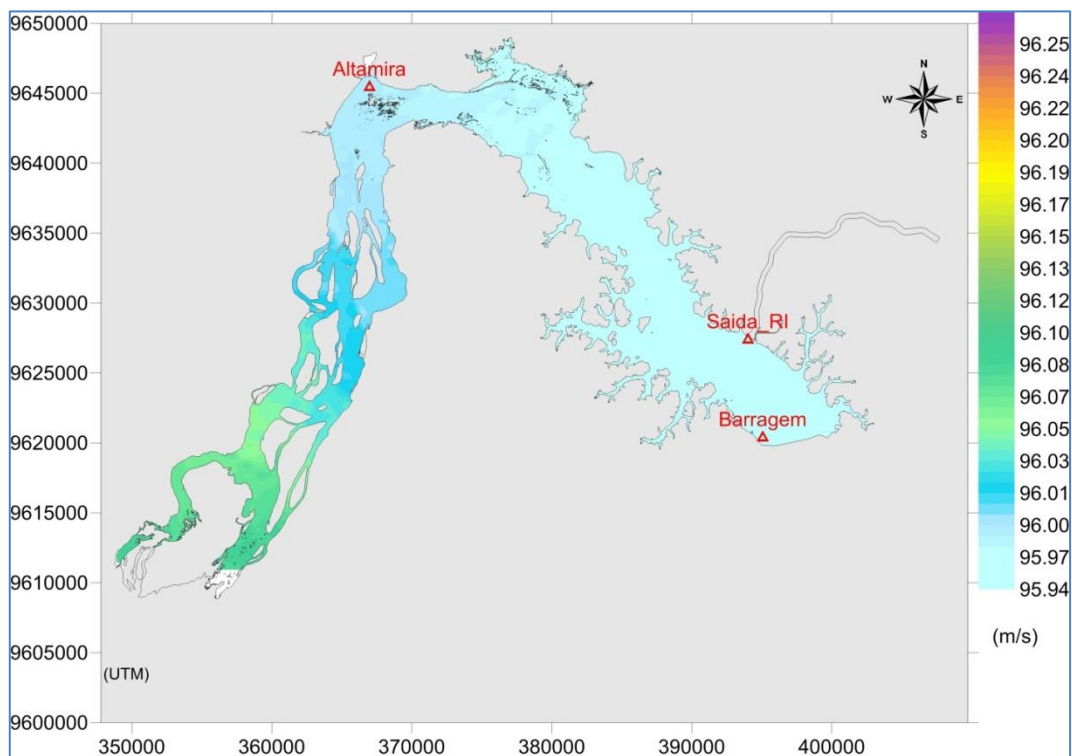


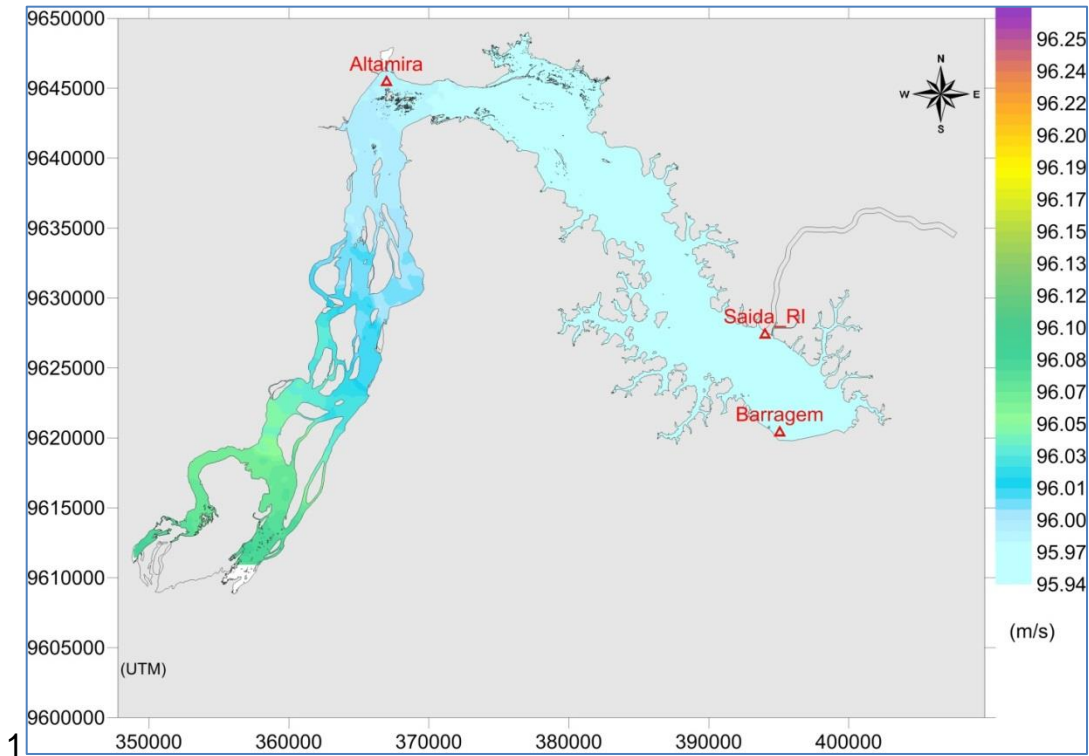
Figura 27: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.



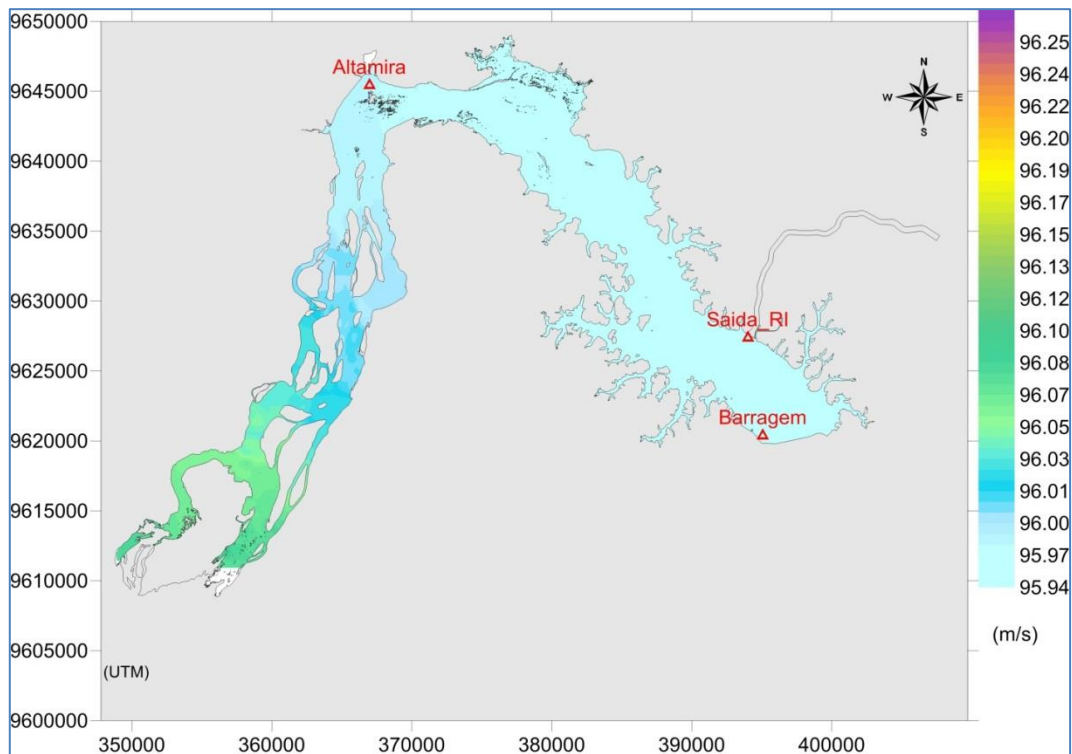
**Figura 28: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



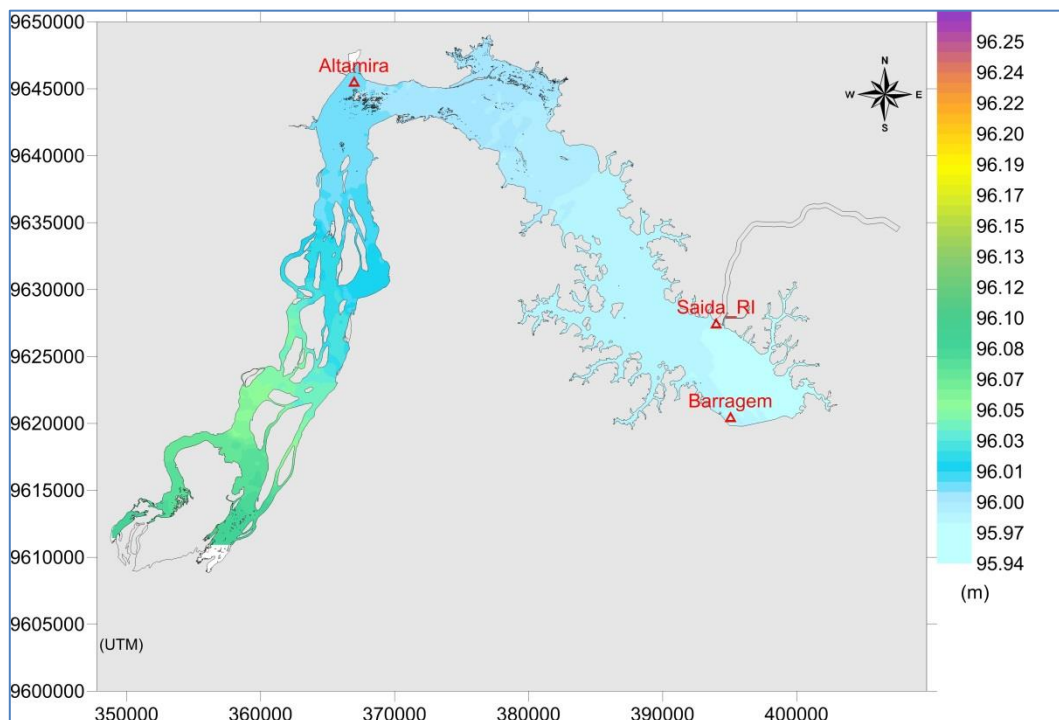
**Figura 29: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



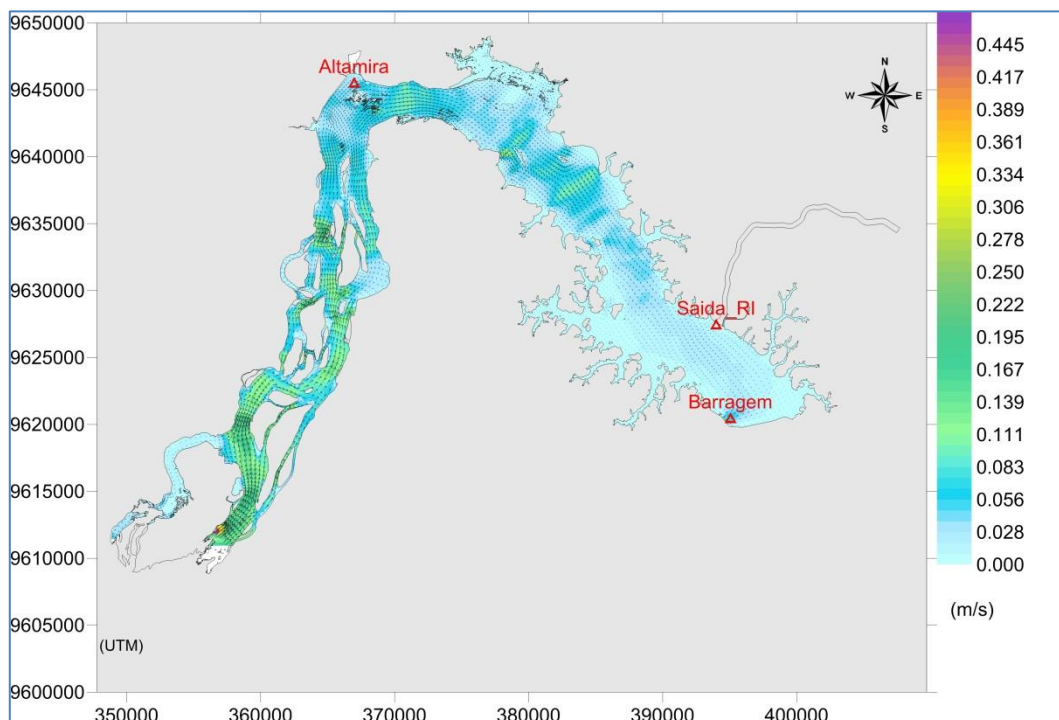
**Figura 30: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 31: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



**Figura 32: Distribuição espacial do nível d'água do Reservatório do Xingu no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**



**Figura 33: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**

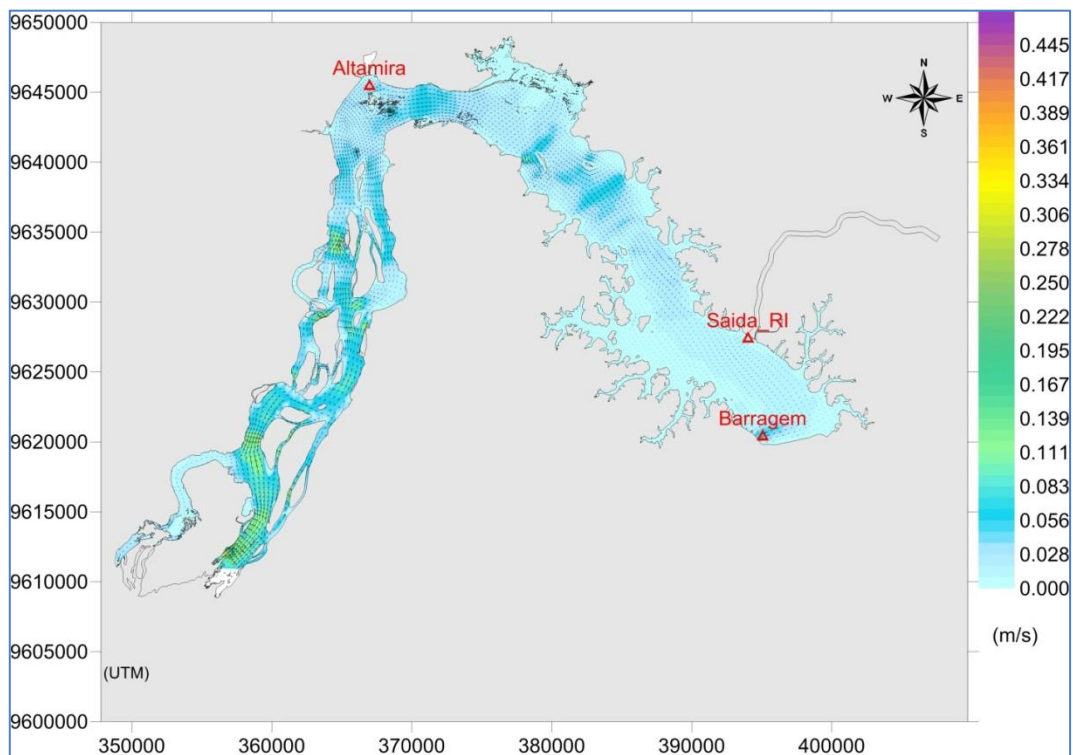


Figura 34: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.

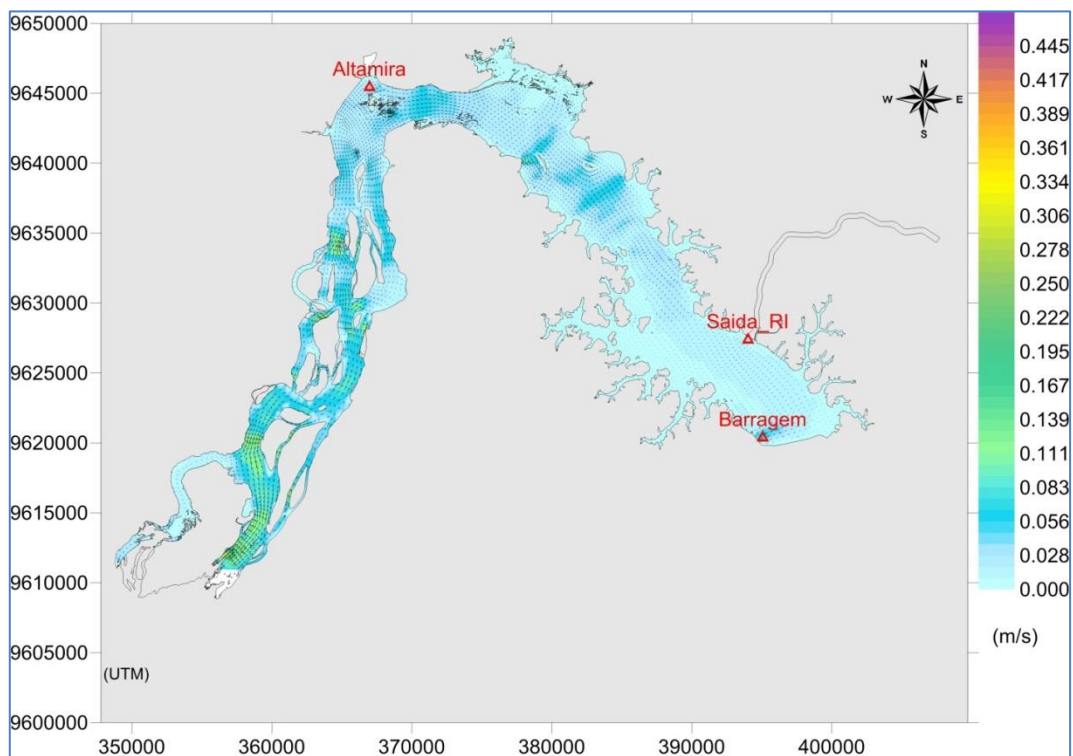
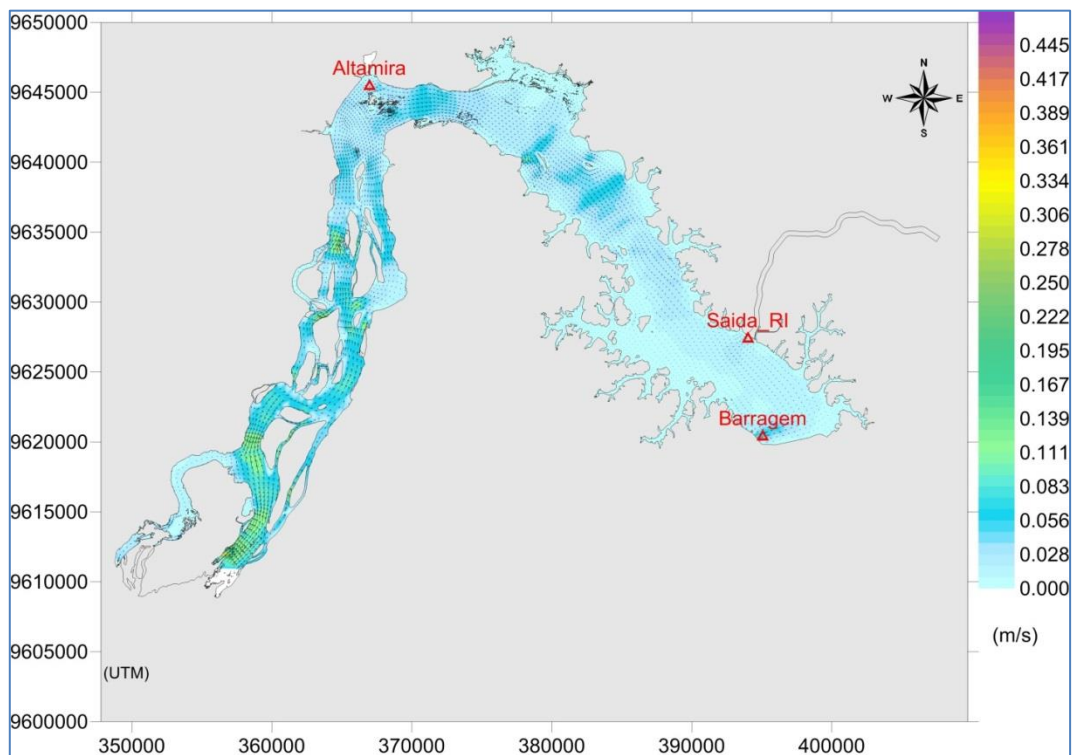
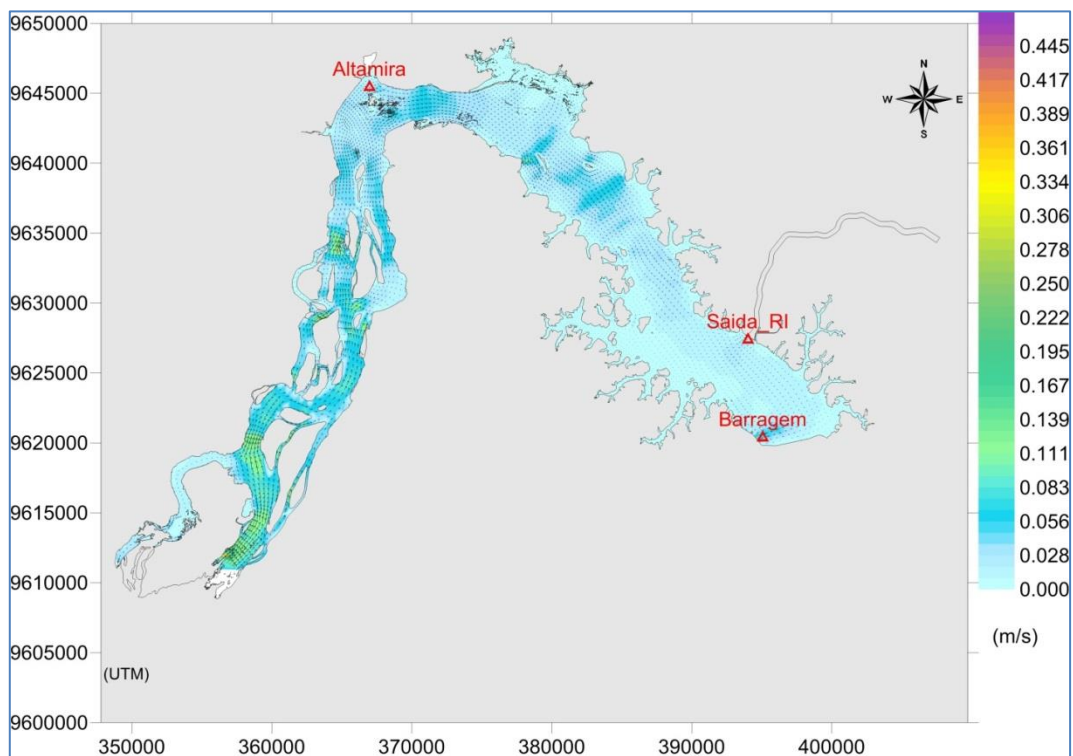


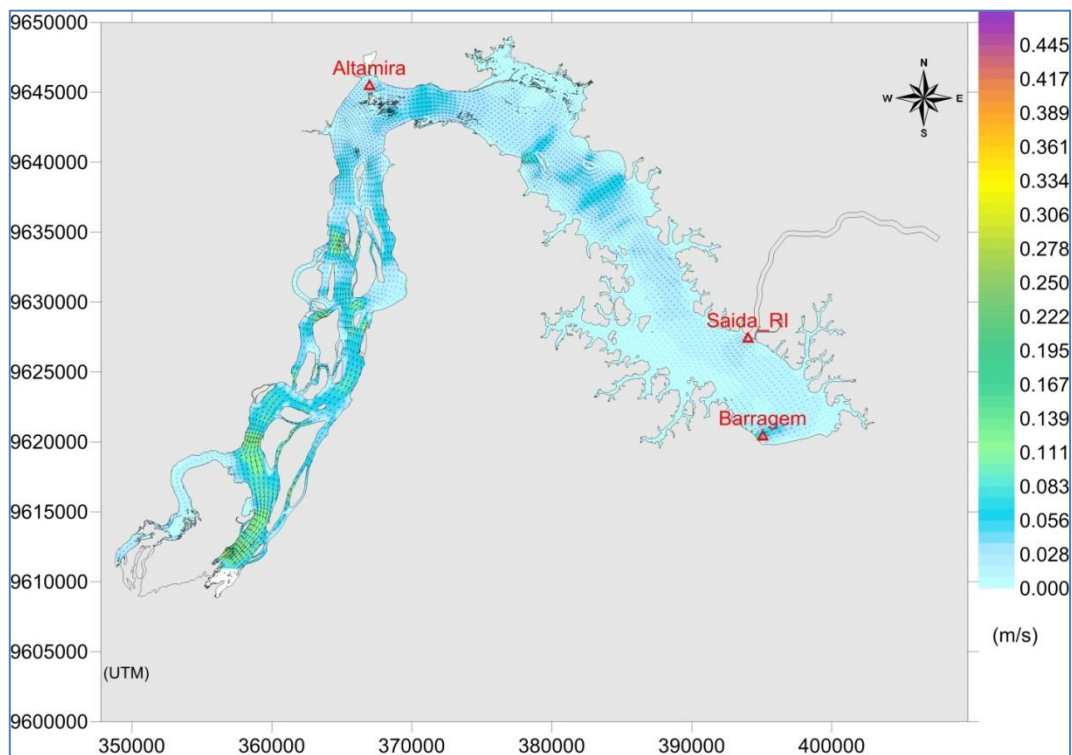
Figura 35: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.



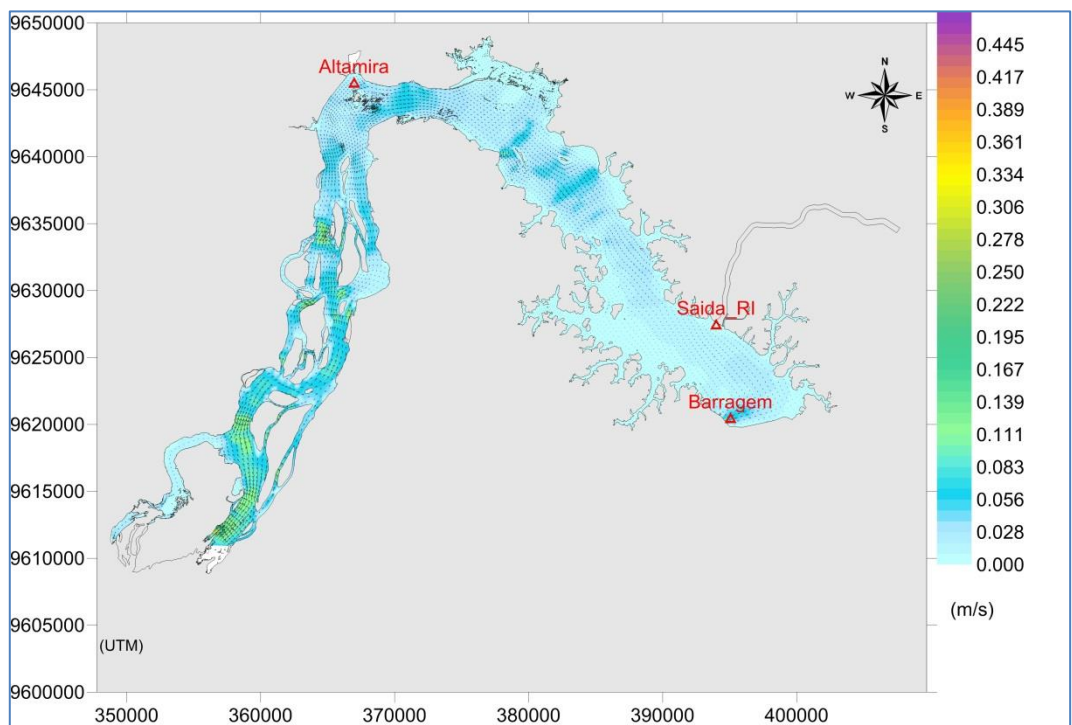
**Figura 36: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 37: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 38: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



**Figura 39: Distribuição espacial das velocidades de corrente no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**



### 4.3. Implementação das simulações de qualidade da água

As condições de contorno e condições iniciais necessárias para o modelo de qualidade da água são as concentrações de todas as propriedades simuladas pelo SisBaHiA® em cada um dos rios afluentes. Essas propriedades são:

- Temperatura (°C)
- Salinidade (mg/L)
- Amônia (mg/L)
- Nitrato (mg/L)
- Zooplâncton (mg/L)
- Nitrogênio Orgânico (mg/L)
- Fósforo Inorgânico (mg/L)
- Fósforo Orgânico (mg/L)
- OD (mg/L)
- DBO (mg/L)
- Clorofila-a (µg/L)

Neste estudo não foram simulados salinidade e zooplâncton, sendo assim, a concentração delas foi considerada nula. Os rios afluentes onde foram definidas as condições de contorno no modelo de qualidade da água são os mesmos utilizados nas simulações hidrodinâmicas. As concentrações utilizadas para cada uma das substâncias foram apresentadas na seção 3.4.

Em termos de condição inicial de qualidade da água do reservatório, a qual representa seu estado inicial, foi feita uma composição de médias das concentrações das variáveis de interesse medidas nos pontos ALT 02, AMB 02, PAN 02 e RX 01. Estes valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Condições iniciais utilizadas nas modelagens de qualidade da água do Reservatório do Xingu.

Parâmetro	Condição inicial do Reservatório do Xingu
Temperatura da água (°C)	27,2418
OD (mg/L)	5,1035

Parâmetro	Condição inicial do Reservatório do Xingu
Fósforo Total (mg/L)	0,0281
Fósforo Inorgânico (mg/L)	0,0187
Fósforo Orgânico (mg/L)	0,0094
Nitrato (mg/L)	0,0945
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,0657
Nitrogênio orgânico (mg/L)	0,0094
DBO (mg/L)	1,3238
Clorofila-a (µg/L)	3,1280

Além disso, as demais considerações acerca de condições iniciais e de contorno foram:

- Para a condição de contorno na entrada do reservatório foram utilizados os dados medidos no ponto RX 01, o mais próximo à entrada do reservatório. A partir dos dados medidos, foram calculadas médias trimestrais; essas médias foram interpoladas de forma a gerar uma série mensal de dados de qualidade da água;
- Para os igarapés Altamira, Panelas e Ambé – correspondentes, respectivamente, aos pontos de medição ALT 02, PAN 02 e AMB 02 – foi feito o mesmo procedimento do RX 01, ou seja, foi gerada uma série mensal de dados de qualidade da água;
- Para os demais afluentes, como não há medições representativas deles, a condição de contorno foi construída a partir das séries mensais geradas para os pontos RX 01, ALT 02, PAN 02 e AMB 02. Considera-se que estes valores representam uma condição média do reservatório.

Importante salientar que, para a composição das condições de contorno e iniciais, foram utilizadas todas as medições disponíveis nos pontos RX 01, ALT 02, PAN 02 e AMB 02 incluindo aquelas realizadas em ambiente lótico (característico de rio, obtidos antes da formação do reservatório) e em ambiente lêntico (obtidos após a formação do reservatório). No caso das condições iniciais, estes valores não tem memória longa influenciando apenas as primeiras horas da simulação – elas são rapidamente levadas para jusante do reservatório, e o corpo d'água passa a responder às condições de contorno que permanecem ativas durante toda a simulação. No caso das condições de

contorno, os dados utilizados foram obtidos em pontos do contorno do reservatório, ou seja, onde há afluência de água. Além disso, uma análise simplificada das ordens de grandeza das medições apresentadas na Tabela 14 mostra que os valores não sofreram grandes alterações após o enchimento do reservatório (que ocorreu em novembro de 2015) apresentando, em alguns casos, qualidade melhor do que na fase rio.

Os parâmetros usados nas reações cinéticas do modelo de qualidade da água são mostrados na Tabela 15 (maiores informações poderão ser obtidas em ROSMAN, 2016). A definição destes parâmetros representa (de forma geral, e não apenas para o presente caso) um desafio na utilização de modelos de qualidade de água com caráter preditivo, portanto não há como escapar de supor que tais parâmetros irão assumir certos valores que podem mudar com o tempo e que podem precisar de calibração. No entanto, muitos destes valores são mais ou menos independentes de situações específicas (ou seja, são mais ou menos universais), além de muitos serem adimensionais (ou seja, independem da escala do problema). Assim, é possível supor que tais parâmetros terão um comportamento dentro de uma faixa de valores ou ainda, supor que eles podem ser considerados na média, de modo que os erros, para mais e para menos, se compensem. Portanto, é muito razoável a utilização de valores destas “constantes” obtidas em laboratórios ou em outros estudos de campo. Diante do fato de que o objetivo do trabalho é obter tendências, fazer comparações de cenários e avaliar possíveis efeitos no futuro reservatório, a utilização de “valores da literatura existente” é perfeitamente justificável.

Tabela 15: Parâmetros utilizados na simulação numérica do modelo de qualidade da água.

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidades
$k_g(20)$	Taxa de crescimento do fitoplâncton a 20 °C	2,0	d <sup>-1</sup>
$k_{Sn}$	Constante de meia saturação de N	25,0	µg N/L
$k_{sP}$	Constante de meia saturação de P	20,0	µg N/L
$I_s$	Nível ótimo de luz	145	ly/d
$k_{sa}$	Constante de meia saturação para predação de zooplâncton sobre alga	10	µg Chla/L
$k_{gz}(20)$	Taxa de predação do fitoplâncton pelo zooplâncton a 20 °C	0,5	m <sup>3</sup> /g C/d
$k_{ra}(20)$	Perdas de fitoplâncton por respiração e excreção a 20 °C	0,2	d <sup>-1</sup>
$k_{rz}(20)$	Perdas do zooplâncton por respiração e excreção a 20 °C	0,03	d <sup>-1</sup>
$E_z$	Eficiência de predação do zooplâncton sobre algas	0,5	-

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidades
$k_{gz}(20)$	Perdas do zooplâncton por predação	0,05	$d^{-1}$
$f_{on}$	Fração de morte e respiração do fitoplâncton reciclada para nitrogênio orgânico	0,5	-
$k_{am}$	Constante de meia saturação para preferência de amônia	50	$\mu g N/L$
$r_{oc}$	Quantidade de oxigênio consumido na decomposição de um grama de carbono orgânico	2,67	$g O/g C$
$r_{pa}$	Razão fósforo/clorofila nas células das algas	2,0	$g P/g Chla$
$r_{na}$	Razão nitrogênio/clorofila nas células das algas	5,0	$g N/g Chla$
$r_{ca}$	Razão carbono/clorofila nas células das algas	10	$g C/g Chla$
$f_{D5}$	Fração de DBO dissolvido na coluna de água	0,5	-
$f_{D7}$	Fração de nitrogênio orgânico dissolvido na coluna de água	0,5	-
$f_{D8}$	Fração de fósforo orgânico dissolvido na coluna de água,	0,85	-
$f_{op}$	Fração de morte e respiração do fitoplâncton reciclada para fósforo orgânico	0,5	-
$k_{12}(20)$	Coeficiente de nitrificação em 20 °C	0,06	$d^{-1}$
$k_D(20)$	Coeficiente de desnitrificação em 20 °C	0,09	$d^{-1}$
$k_{71}(20)$	Coeficiente de amonificação em 20 °C	0,08	$d^{-1}$
$k_{83}(20)$	Coeficiente de mineralização do fósforo orgânico em 20 °C	0,2	$d^{-1}$
$k_a(20)$	Coeficiente de reaeração em 20 °C	automático	$d^{-1}$
$k_D(20)$	Coeficiente de desoxigenação em 20 °C	0,2	$d^{-1}$
$k_{DBO}$	Constante de meia saturação para oxidação da DBO	0,5	$mg O_2/L$
$k_{NIT}$	Constante de meia saturação da nitrificação por limitação de oxigênio	2,0	$mg O_2/L$
$k_{NO3}$	Constante de meia saturação da desnitrificação por limitação de oxigênio	0,1	$mg O_2/L$
$k_{ea}$	Taxa de mortalidade do fitoplâncton	0,1	$d^{-1}$
$k_{ez}$	Taxa de mortalidade do zooplâncton	0,01	$d^{-1}$
$SOD(20)$	Demanda de oxigênio no sedimento em 20 °C	0,2	$g O_2/m^2/d$
$vs_3$	Velocidade de deposição de substância orgânica	0,01	$m/d$
$vs_4$	Velocidade de sedimentação da biomassa	0,15	$m/d$
$v_{fr}$	Velocidade de precipitação do fósforo inorgânico	0,1	$m/d$
$k_{ox}$	Taxa potencial de oxidação	0,065	$d^{-1}$

#### 4.4. Resultados das simulações de qualidade da água

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações de qualidade da água para os 7 cenários definidos na seção 1.3. São apresentados resultados para os parâmetros DBO (demanda bioquímica de oxigênio), OD (oxigênio dissolvido), Nitrogênio Amoniacal, Nitrato, Fósforo Total, Clorofila-a e também para temperatura.

Considerando as múltiplas possibilidades de apresentação de resultados, são apresentadas a evolução temporal e a distribuição espacial das variáveis modeladas – deve-se ter em mente que os resultados obtidos a partir da modelagem bidimensional com o SisBaHiA® representam médias na direção vertical do reservatório. Destaca-se que o OD é o parâmetro mais importante do ponto de vista da fauna aquática; enquanto a DBO é um bom indicador da presença de matéria orgânica disponível para degradação.

O Reservatório do Xingu foi formado no eixo do rio Xingu, um rio de classe 2. Sendo assim, os resultados da modelagem de qualidade de água são comparados com os valores estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de classe 2. Os valores da referida resolução são balizadores e são apresentados na Tabela 16. Para fins de comparação, para o Fósforo Total, adotou-se o limite de 0,05 mg/L, valor referente a ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias.

*Tabela 16: Limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para rios de Classe 2 e ambientes intermediários.*

Parâmetro	Limite Conama 357/2005 - Classe 2
OD (mg O <sub>2</sub> /L)	> 5,0
Amônia (mg N/L)	3,7 para pH ≤ 7,5
Nitrato (mg N/L)	<10,0
Fósforo Total (mg P/L)	<0,05
DBO (mg/L)	< 5,0
Clorofila-a (µg/L)	<30,0

As simulações de qualidade da água foram realizadas para o mesmo período das simulações da hidrodinâmica, isto é, 12 meses, com início em 01 de junho.

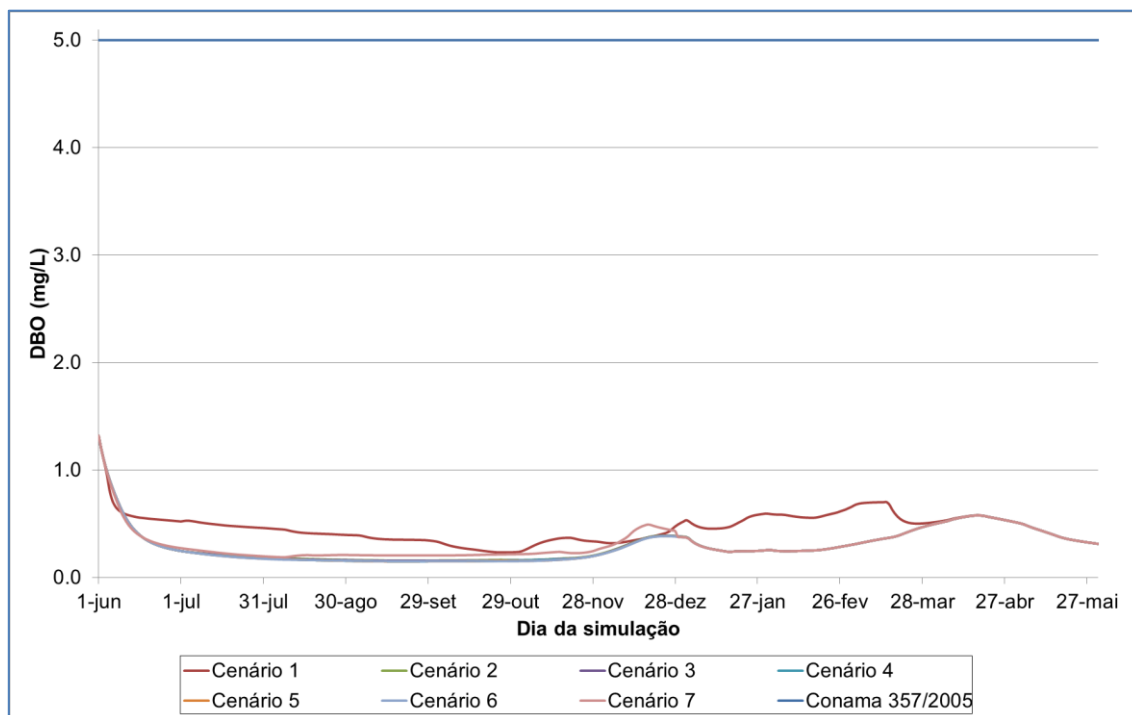
Os resultados temporais são apresentados para dois pontos de interesse localizados dentro do reservatório – um na saída do RX para o RI (Canal de Derivação) – denominado Saída RI, e outro na saída do RX para o Trecho de Vazão Reduzida (TVR) – denominado Barragem. A localização desses pontos é apresentada posteriormente nos mapas de distribuição espacial de concentrações das variáveis simuladas.

As distribuições espaciais são apresentadas para as concentrações de OD, DBO, Amônia, Nitrato, Fósforo Total, e Clorofila-a – todas comparadas com limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005. Além destes, também são apresentadas as distribuições espaciais de temperatura. Para apresentação das distribuições espaciais, foi escolhido um período considerado crítico, neste caso, o período que apresenta a menor vazão na série considerada, representado pelo dia 15 de setembro - tipicamente a água apresenta pior qualidade em períodos de baixas vazões. É importante ter em mente que as concentrações resultantes do modelo são valores promediados na vertical, ou seja, são valores médios para a toda a coluna d'água.

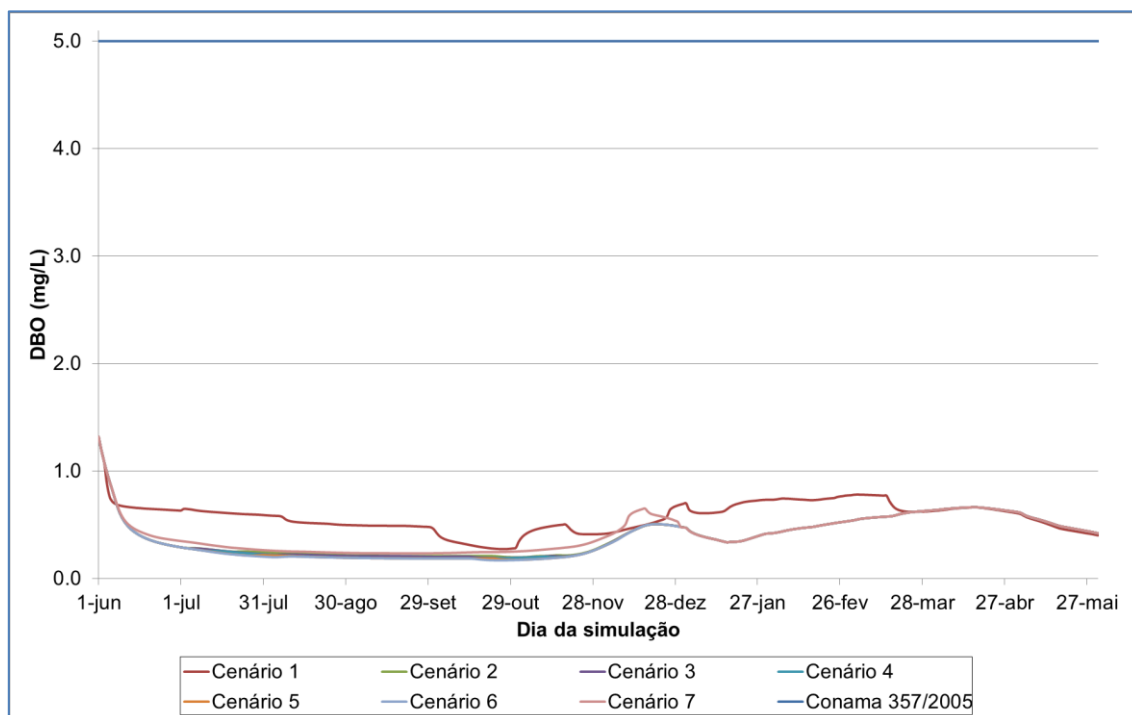
#### 4.4.1. **Resultados para Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)**

Para os pontos Barragem e Saída RI, as evoluções temporais de DBO são apresentadas na Figura 40 e na Figura 41. Em ambos os casos, para os pontos analisados, a máxima concentração observada não ultrapassa 1,2 mg/L. As duas séries temporais são muito semelhantes durante todo o período simulado, e não há extrapolação do limite legal máximo de 5,0 mg/L.

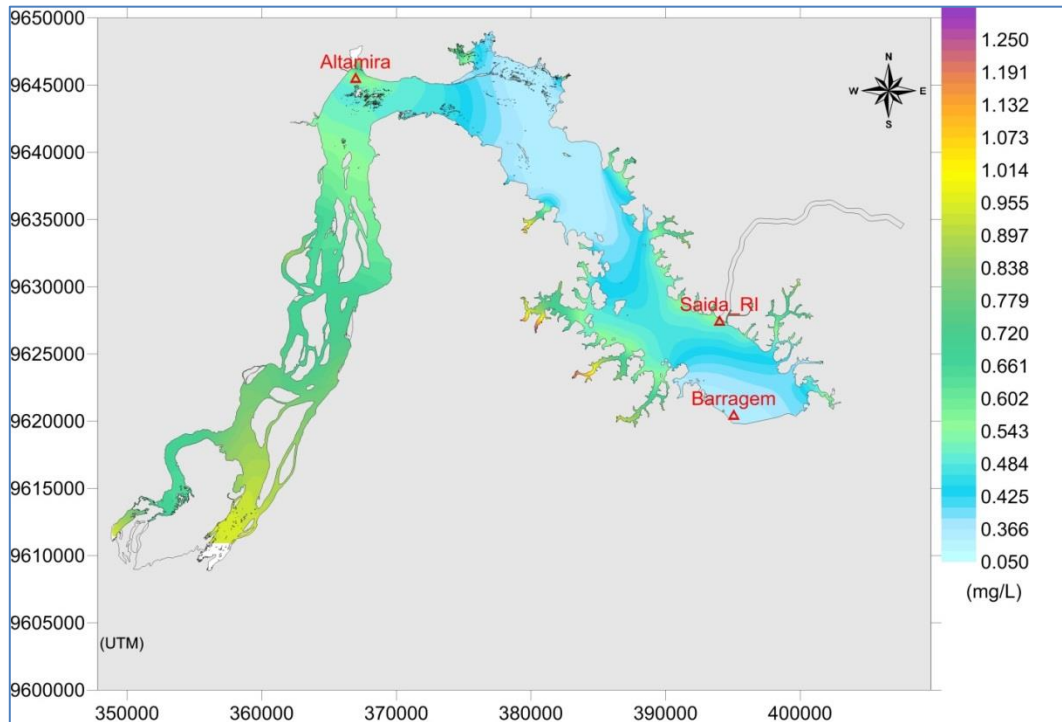
As distribuições espaciais das concentrações de DBO para o período de estiagem são apresentadas da Figura 42 até a Figura 48, respectivamente para os cenários 1 a 7. Observam-se distribuições espaciais muito semelhantes – maiores concentrações de DBO são observadas na região mais a montante de Altamira e em alguns braços do reservatório onde as velocidades de corrente tendem a ser menores, principalmente durante o período de seca – as maiores concentrações são da ordem 1,0 mg/L, valor muito abaixo do limite legal de 5,0 mg/L. Importante observar que as simulações foram realizadas considerando o reservatório já estabilizado em relação a possíveis efeitos que o afogamento de material vegetal orgânico possa ter causado à qualidade da água. Dessa forma, é de se esperar que as concentrações sejam praticamente constantes ao longo de toda a área por não haver fonte importante de DBO ao longo do reservatório – neste caso as concentrações de DBO ficam entre cerca de 0,2 e 1,2 mg/L.



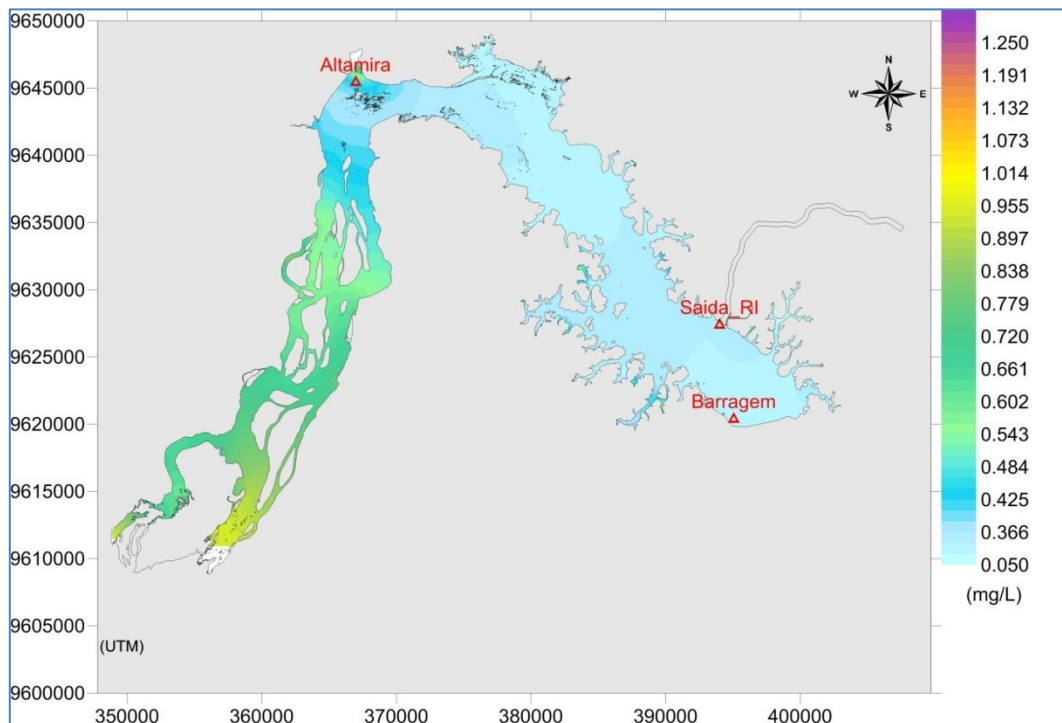
**Figura 40: Evolução temporal das concentrações de DBO (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu (Barragem), e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.**



**Figura 41: Evolução temporal das concentrações de DBO (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu (Saída RI), e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.**



**Figura 42: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



**Figura 43: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



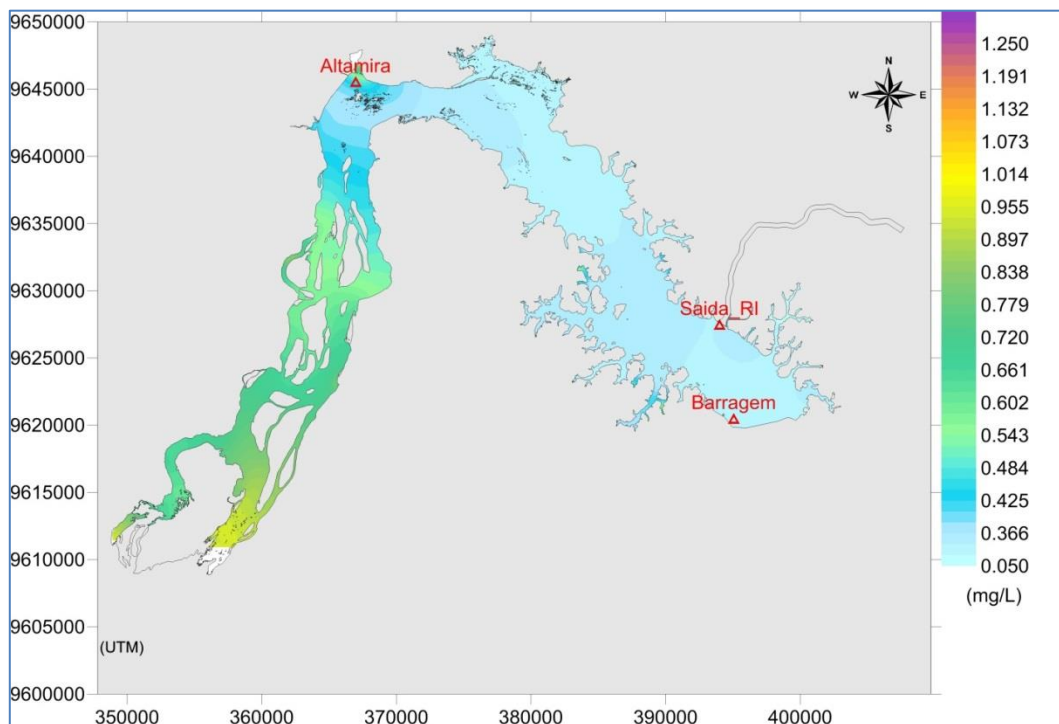


Figura 44: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.

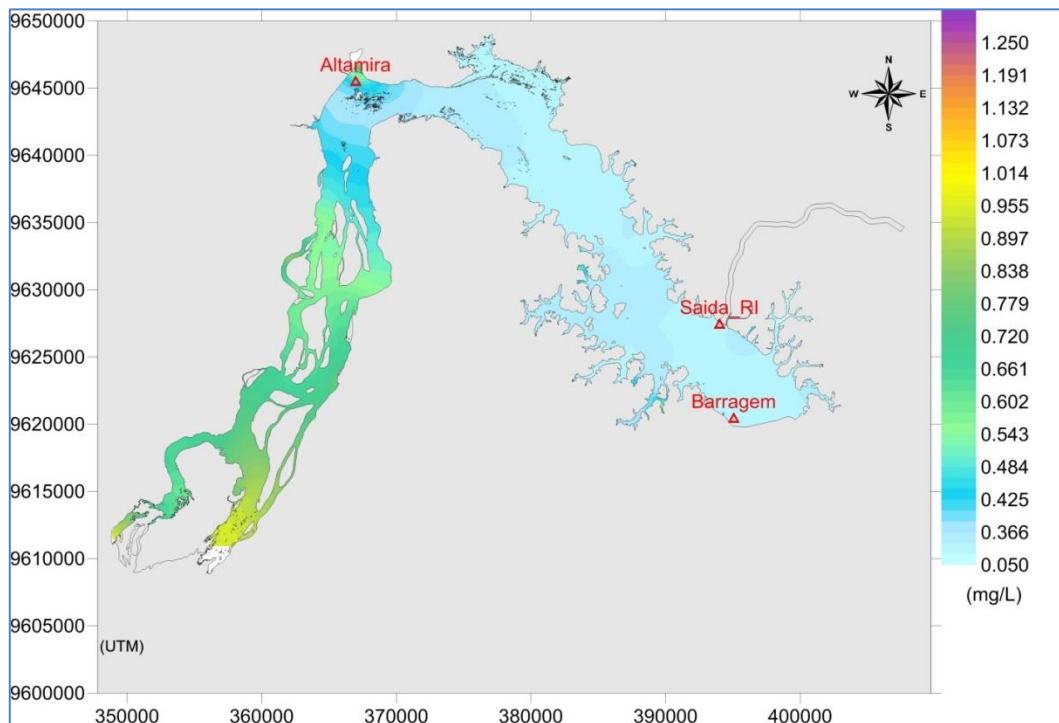
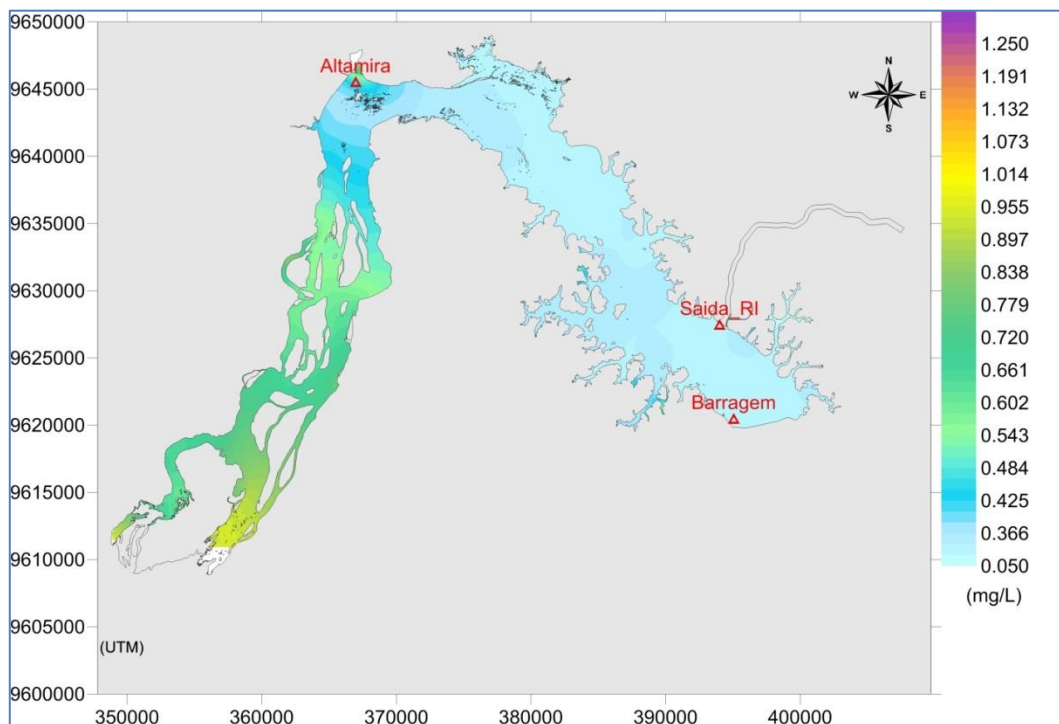
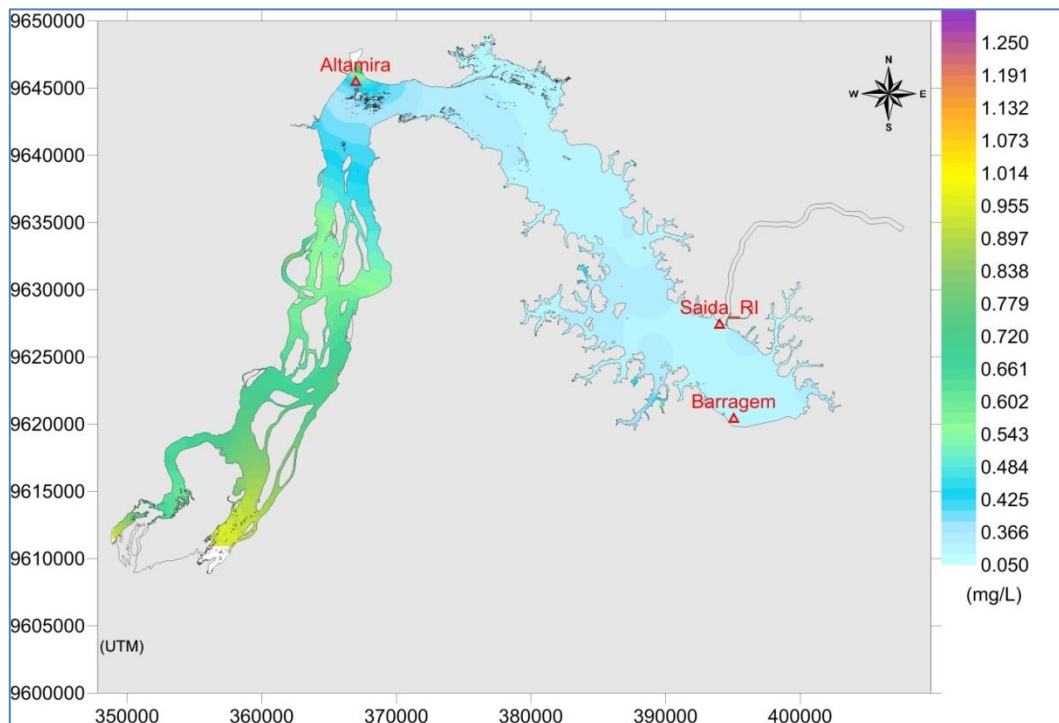


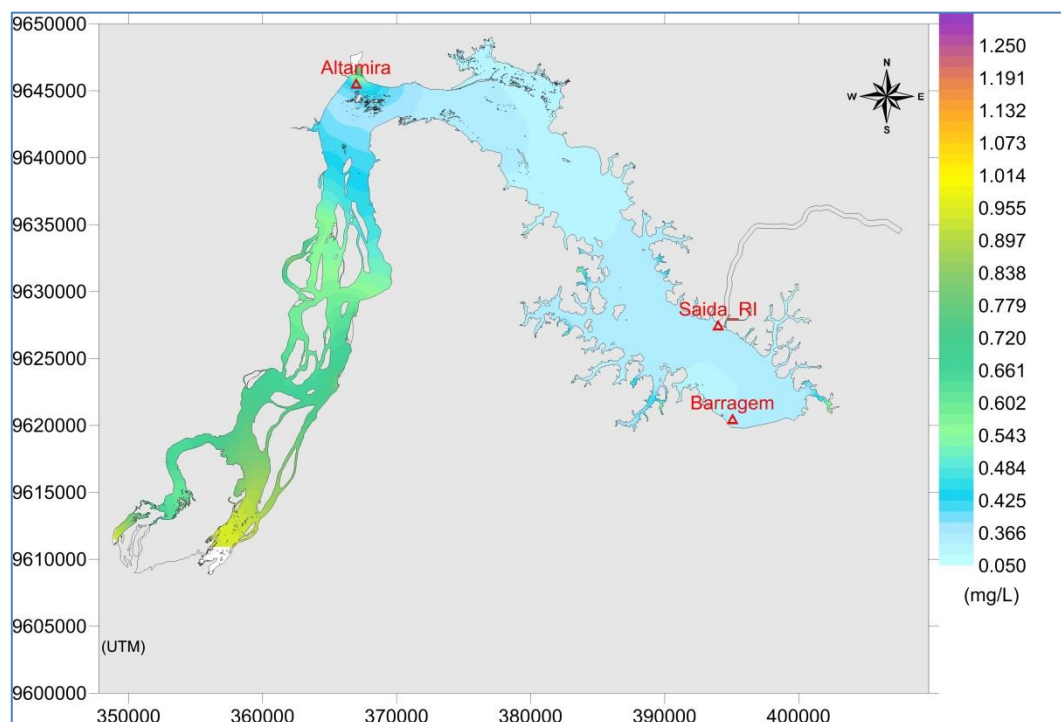
Figura 45: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.



**Figura 46: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 47: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



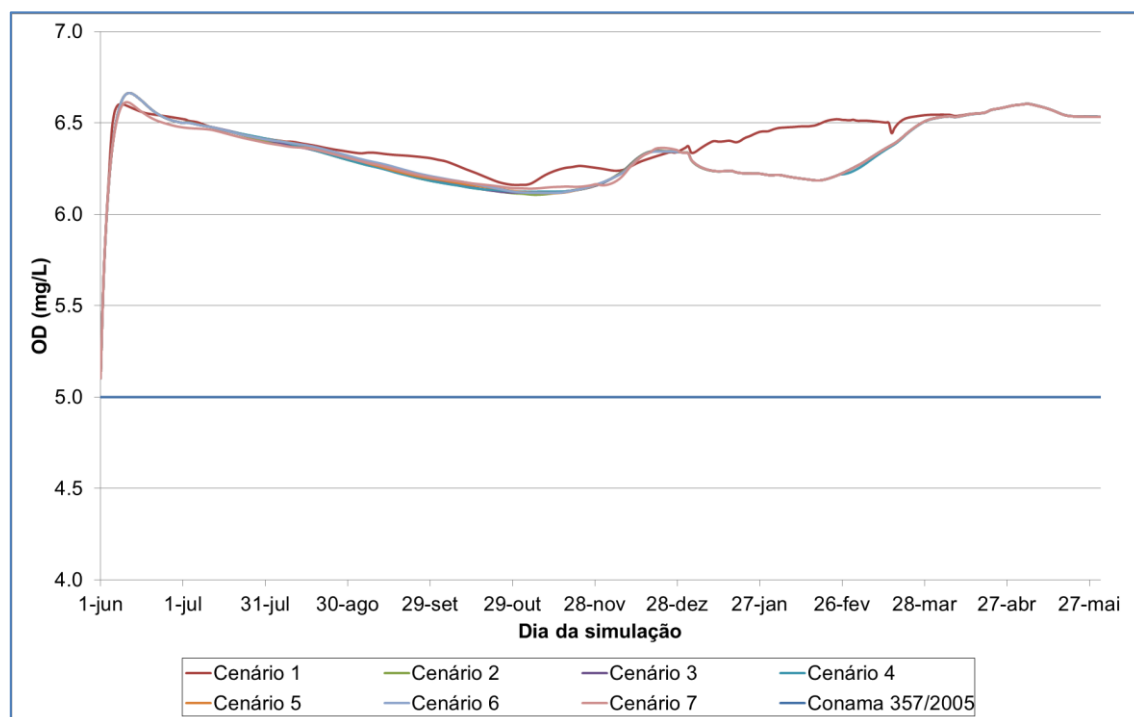
**Figura 48: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

#### 4.4.2. Resultados para Oxigênio Dissolvido (OD)

As evoluções temporais de OD para os pontos Barragem e Saída RI são apresentadas na Figura 49 e na Figura 50 - nos dois pontos as concentrações ao longo do tempo são semelhantes e ficam sempre entre 6,0 e 7,0 mg/L – valores acima do limite legal mínimo de 5,0 mg/L (Resolução CONAMA 357/2005 para Classe 2).

Da Figura 51 até a Figura 57 são apresentadas as distribuições espaciais das concentrações de OD para o período de estiagem (15 de setembro). Novamente observam-se distribuições muito semelhantes em todos os cenários – concentrações menores do que 5,0 mg/L são observadas em algumas regiões dos braços da margem esquerda e da região mais próxima à barragem, no entanto estas são sempre maiores do que 4,5 mg/L. Da mesma forma que para DBO, as regiões menos favoráveis são as de menores velocidades de corrente, e conseqüentemente com menor reaeração e renovação da água.

Nas simulações realizadas, as concentrações ao longo de todo o reservatório ficam acima de 5,0 mg/L. Na região mais a montante as concentrações são maiores (da ordem de 7,0 mg/L) devido às menores profundidades associadas com a vazão afluyente – as velocidades de corrente são maiores, consequentemente a reaeração é maior. Conforme o reservatório torna-se mais profundo, as velocidades de corrente tornam-se menores, e a reaeração diminui – as menores concentrações observadas, no período de estiagem, são da ordem de 5,5 mg/L em alguns dos braços esquerdos mais próximos da barragem.



**Figura 49: Evolução temporal das concentrações de OD (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu (Barragem), e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.**

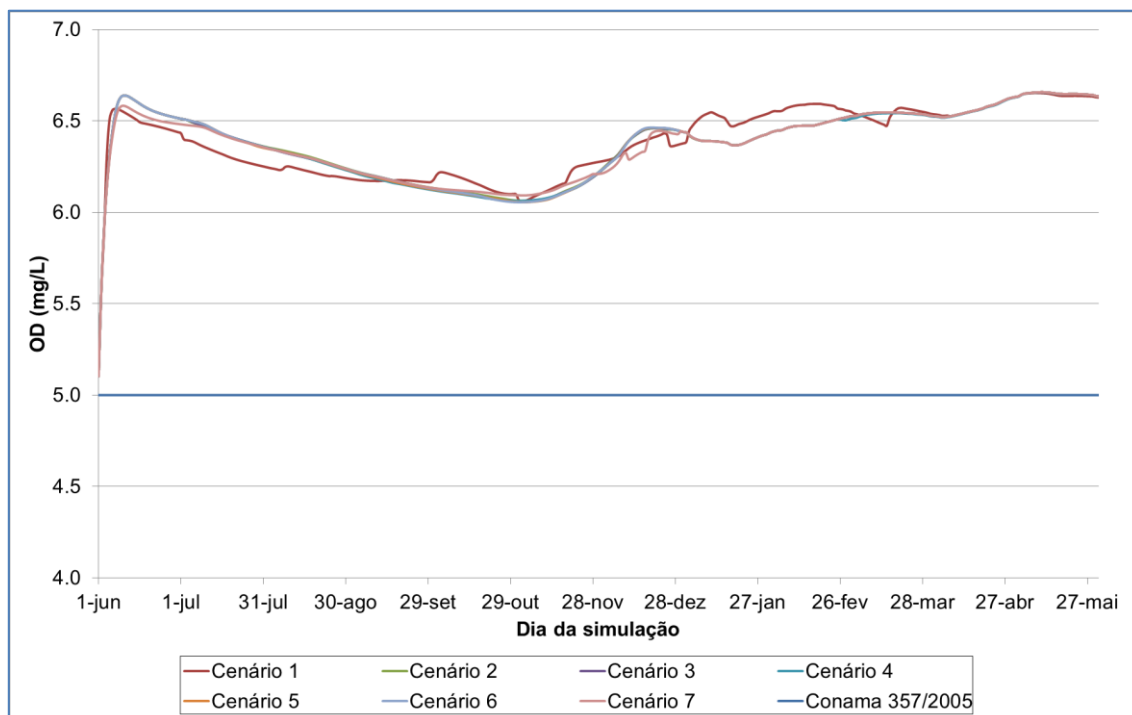


Figura 50: Evolução temporal das concentrações de OD (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu (Saída RI), e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.

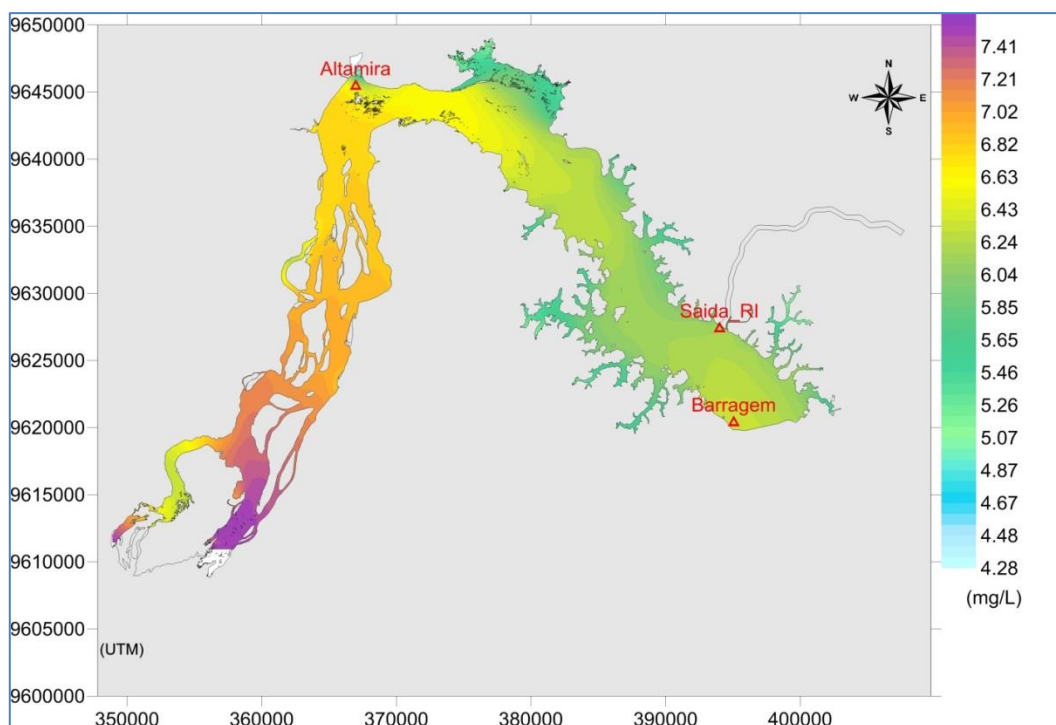


Figura 51: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.

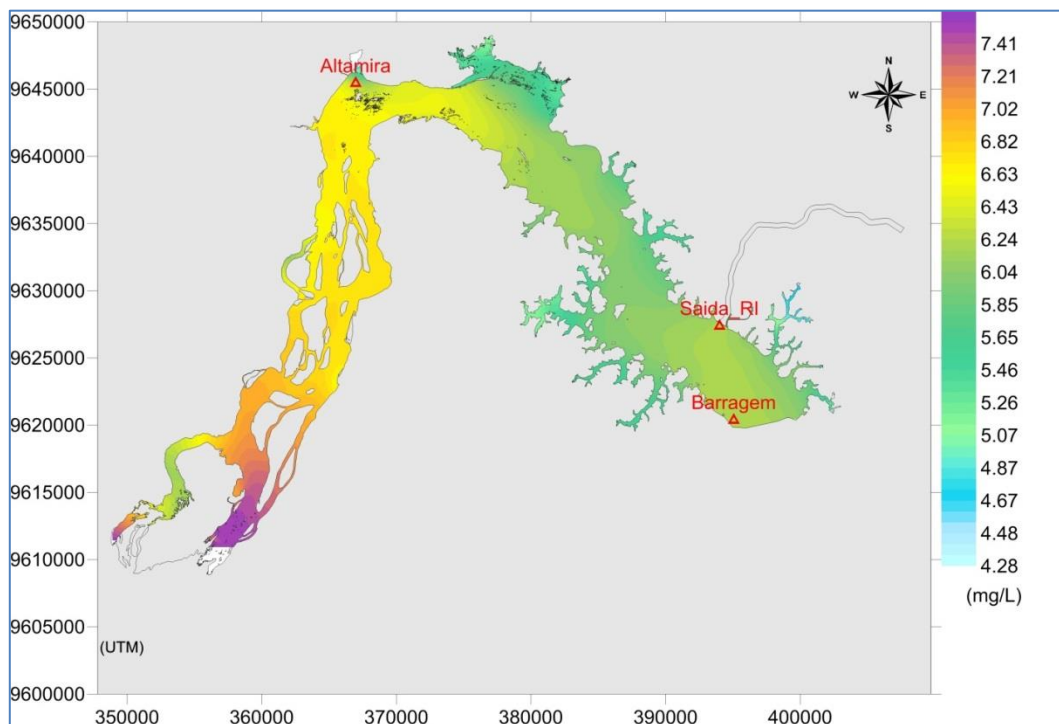


Figura 52: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.

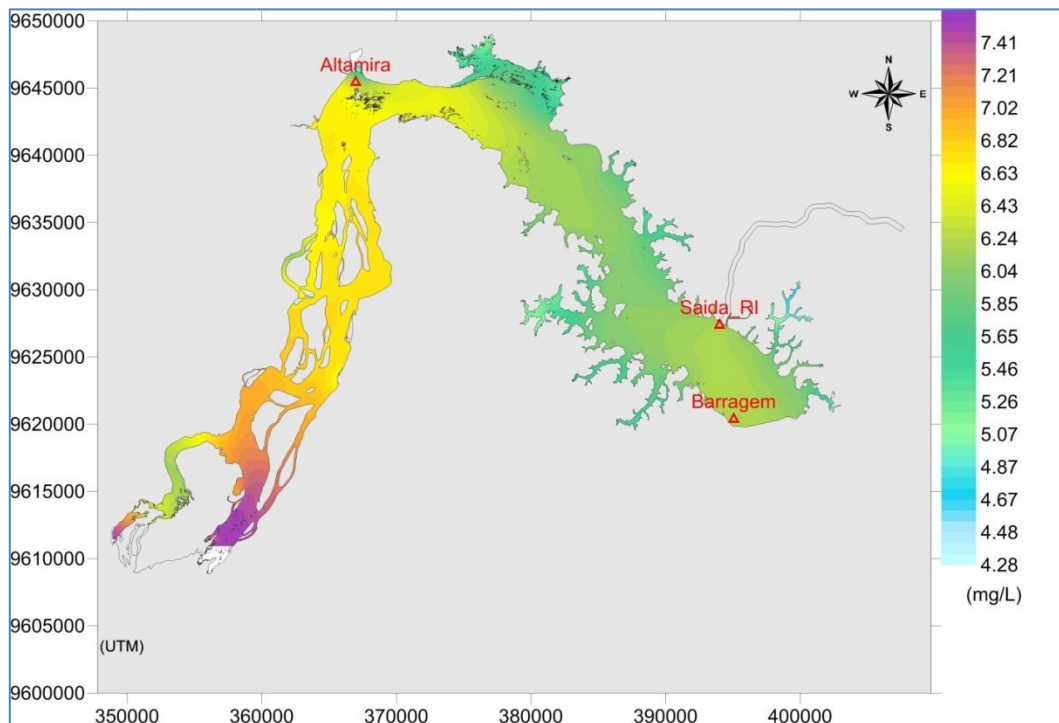


Figura 53: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.

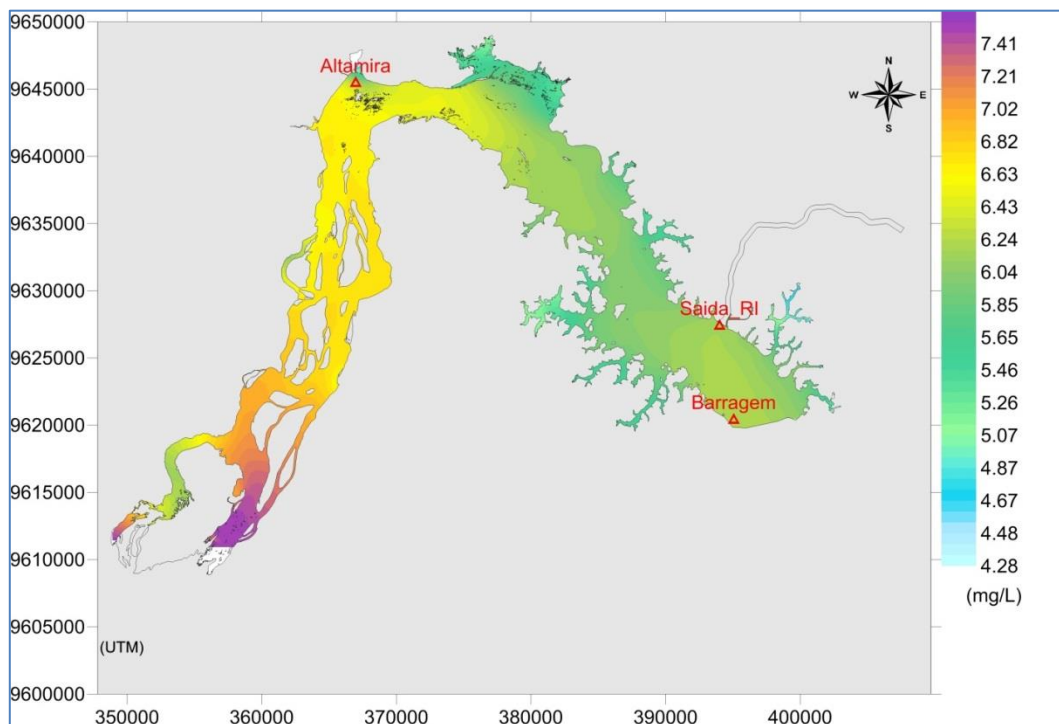


Figura 54: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.

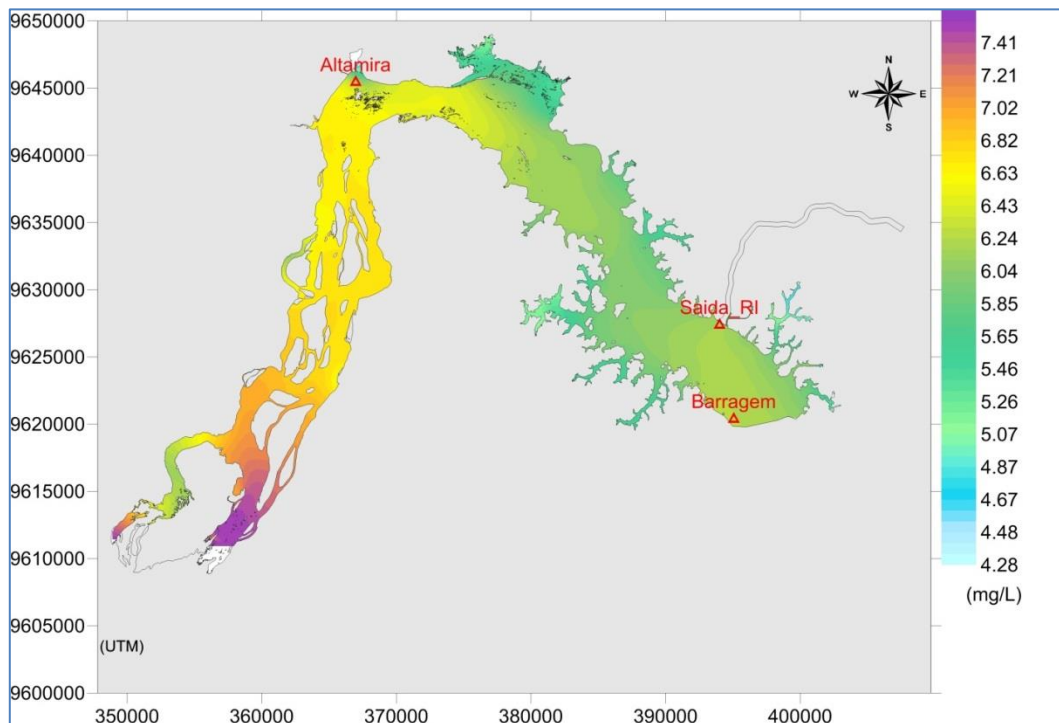
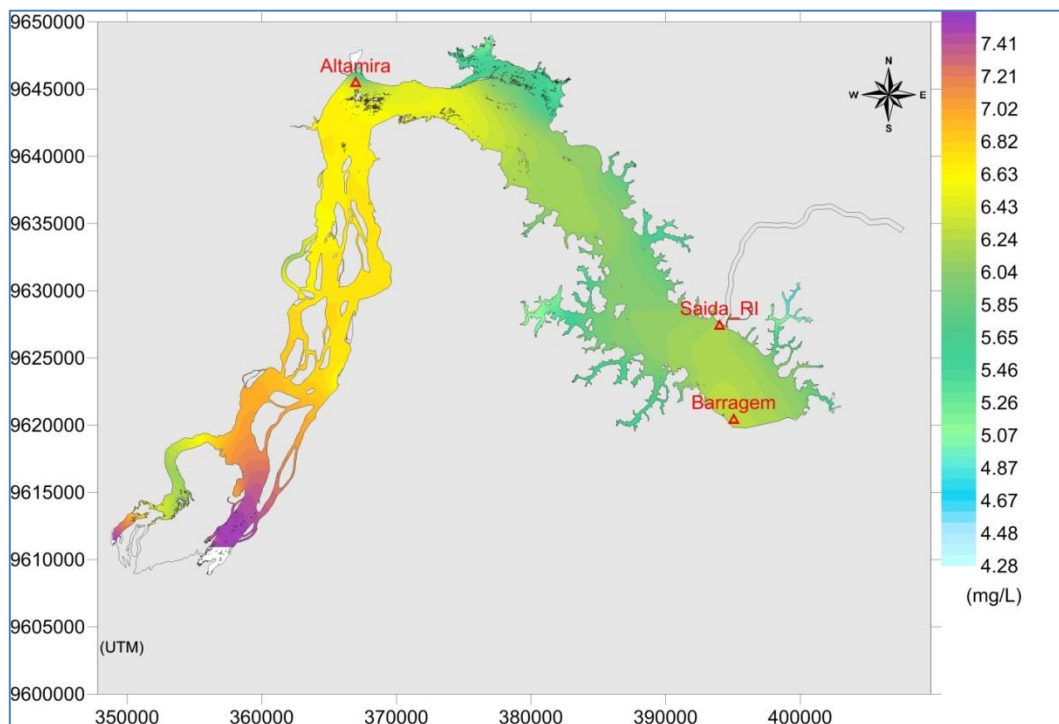
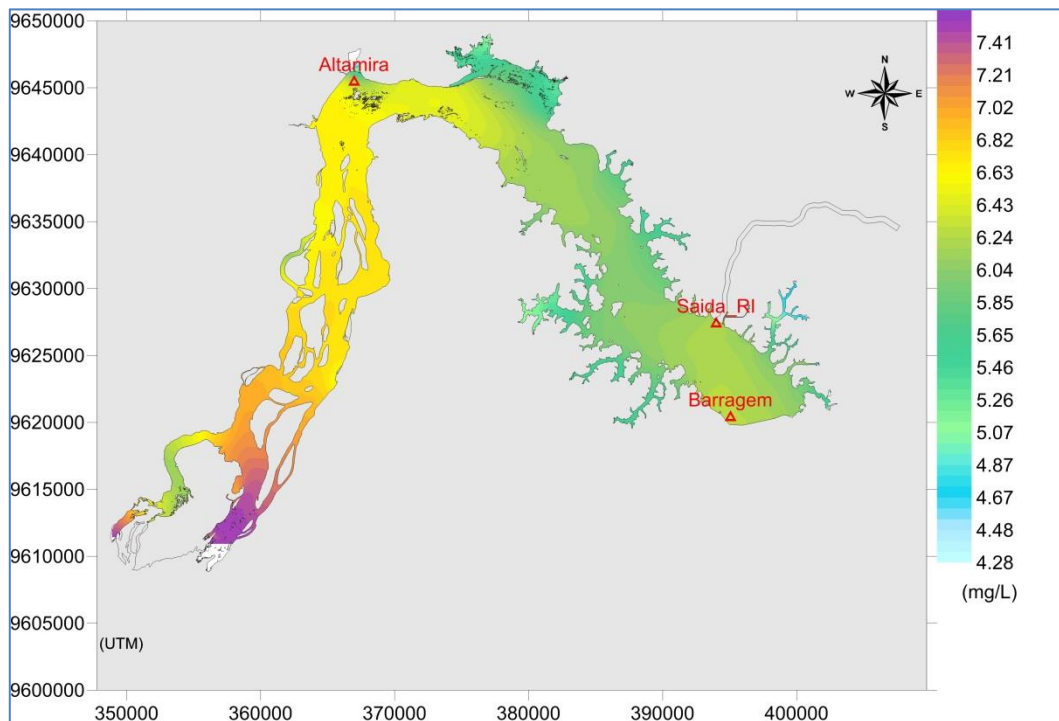


Figura 55: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.



**Figura 56: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



**Figura 57: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**



#### 4.4.3. Resultados para Nitrogênio Amoniacal

Para Nitrogênio Amoniacal, as evoluções temporais são apresentadas na Figura 58 e na Figura 59 respectivamente para os pontos Barragem e Saída RI – as concentrações estão em escala logarítmica. Conforme observado para OD e DBO, as evoluções temporais são semelhantes para todos os cenários, e não ultrapassam 0,3 mg/L. O limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para Classe 2, em corpos hídricos com  $\text{pH} < 7,5$ , é de 3,7 mg/L; considerando esse limite, para os pontos analisados, não ocorre extrapolação em nenhum dos cenários.

Especialmente, para o período de estiagem (Figura 60 até Figura 66), as maiores concentrações observadas também são de cerca de 0,30 mg/L num trecho do reservatório próximo a Altamira. As concentrações de Nitrogênio Amoniacal ficaram entre 0,01 e 0,3 mg/L ao longo de todo o reservatório, valores bem abaixo do limite legal estabelecido.

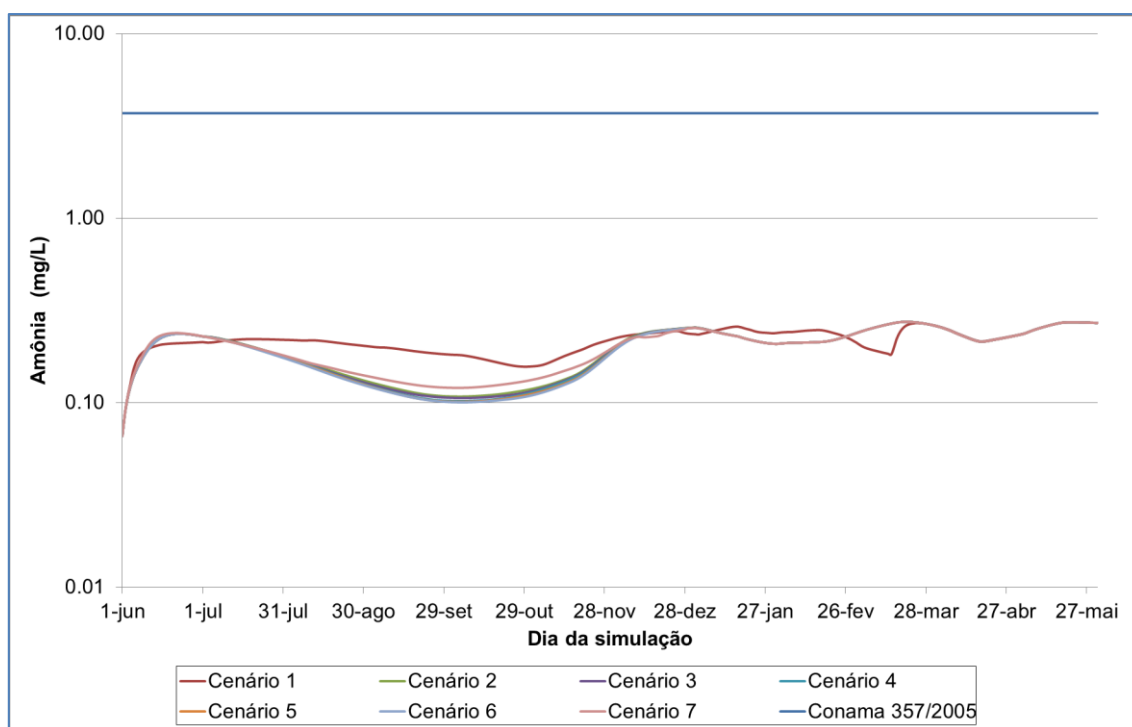
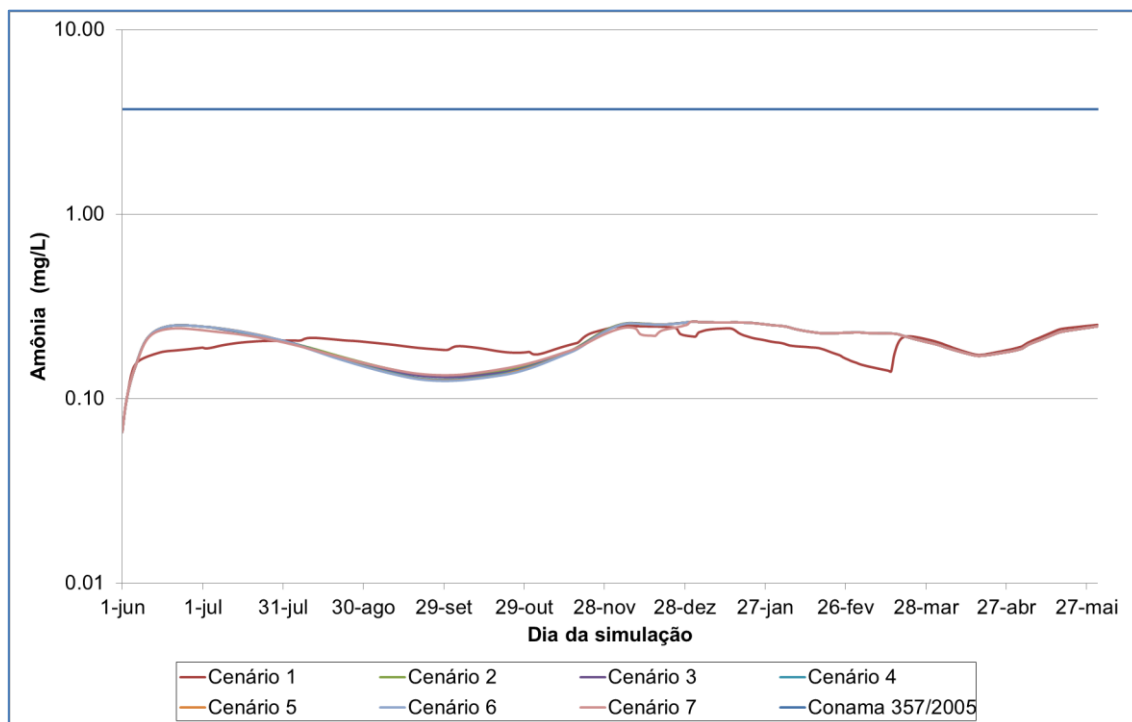
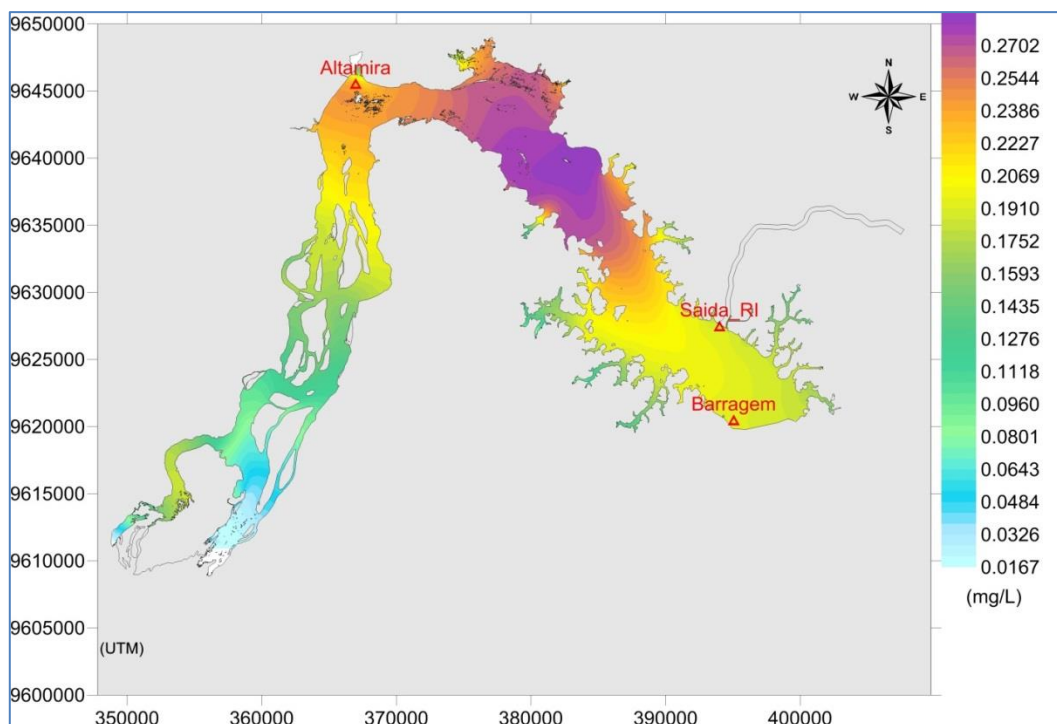


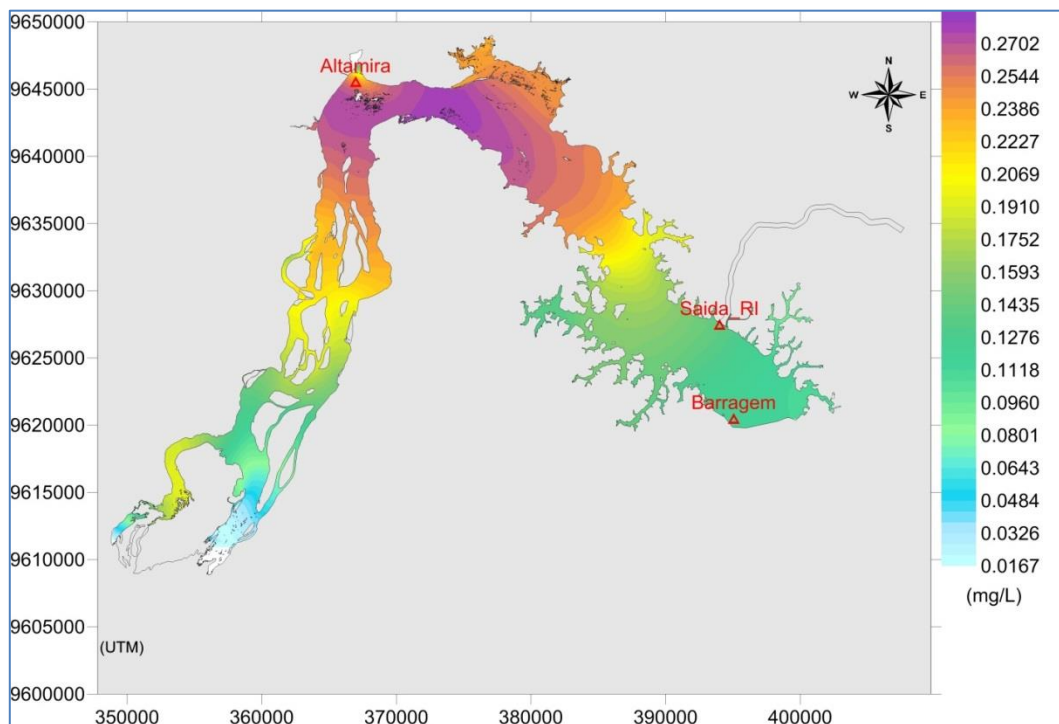
Figura 58: Evolução temporal das concentrações de Amônia (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.



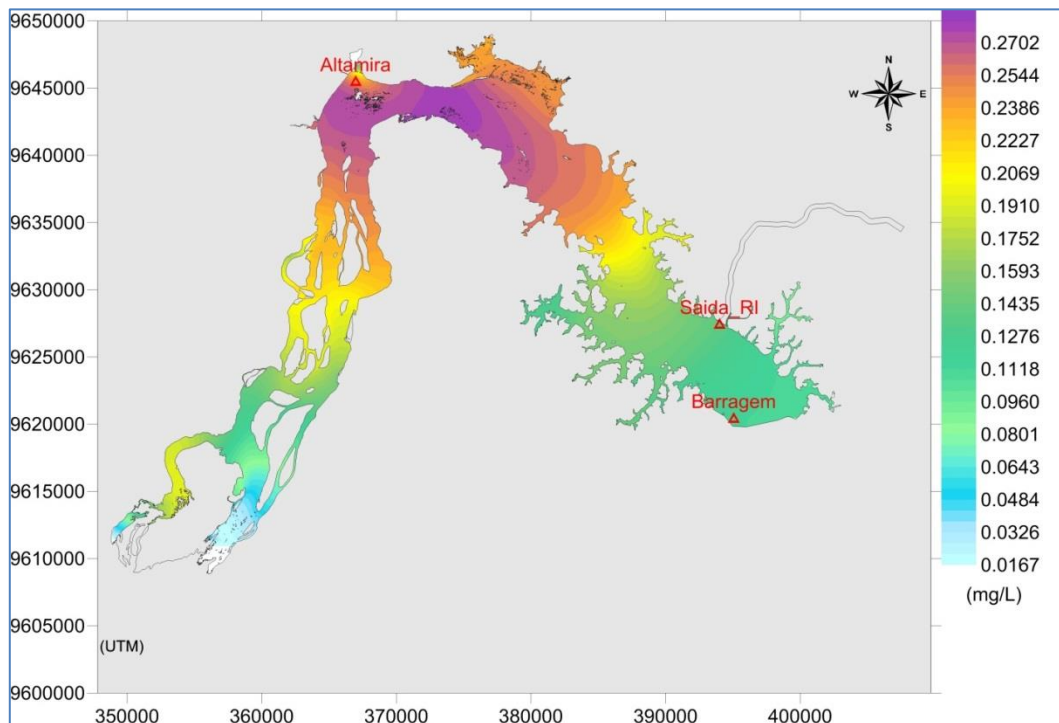
**Figura 59: Evolução temporal das concentrações de Amônia (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.**



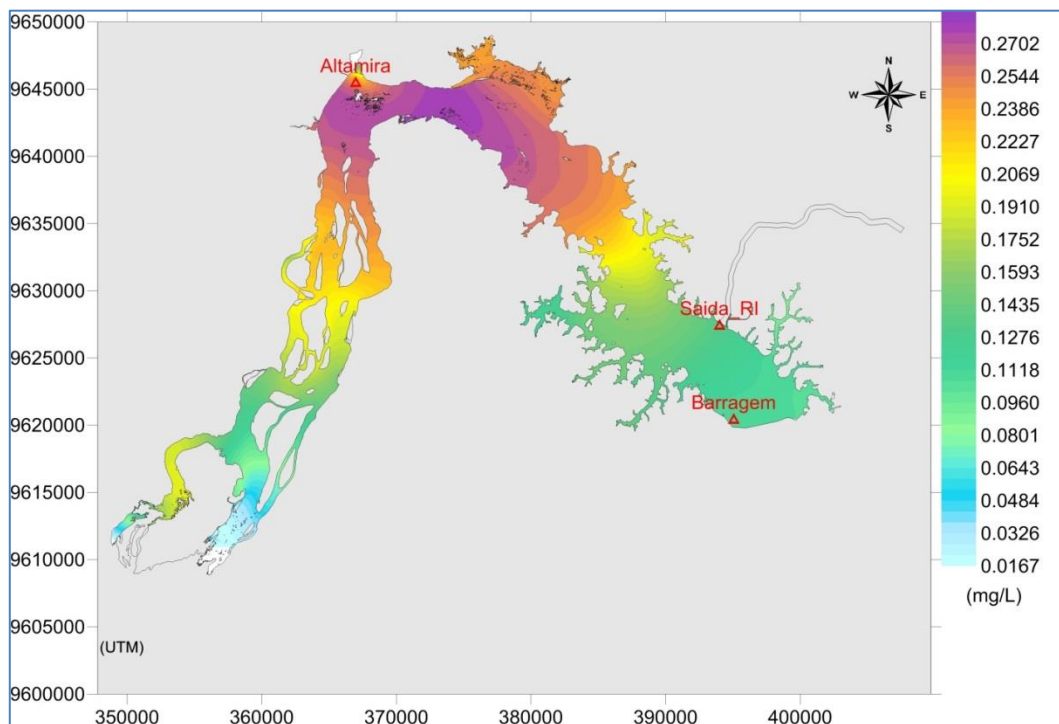
**Figura 60: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



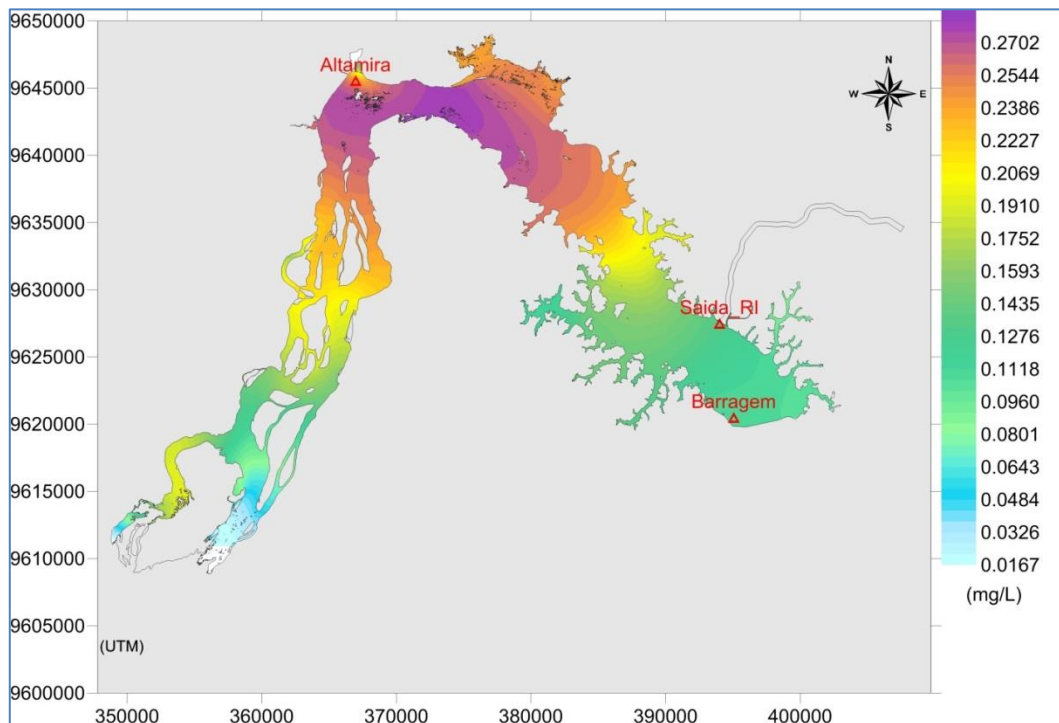
**Figura 61: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



**Figura 62: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



**Figura 63: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 64: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**

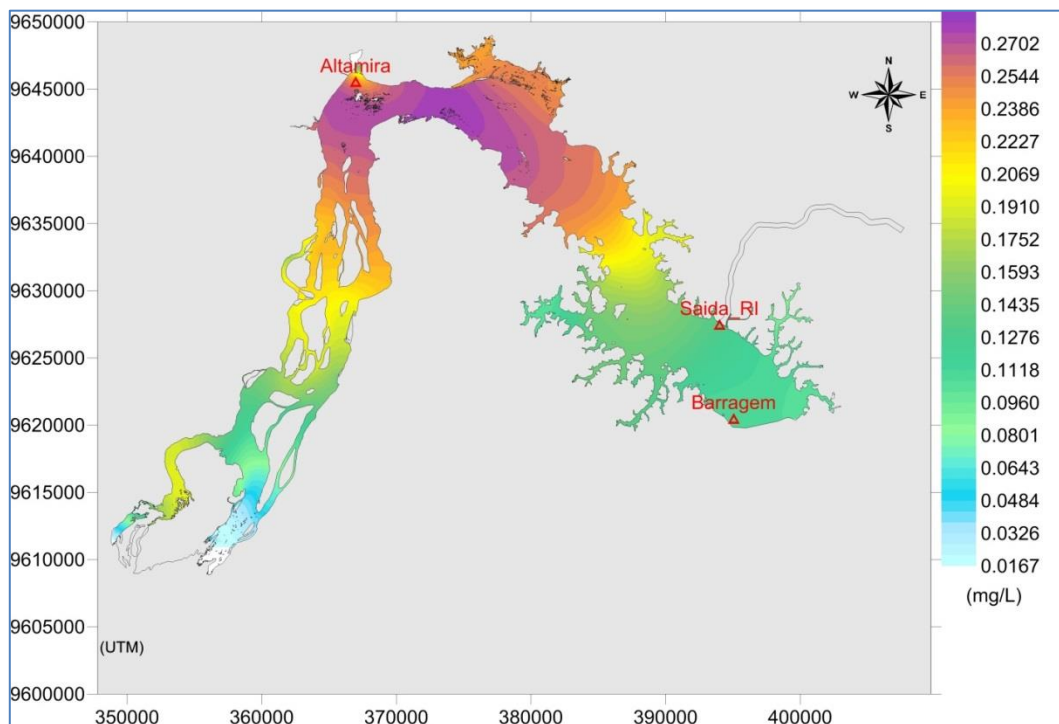


Figura 65: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.

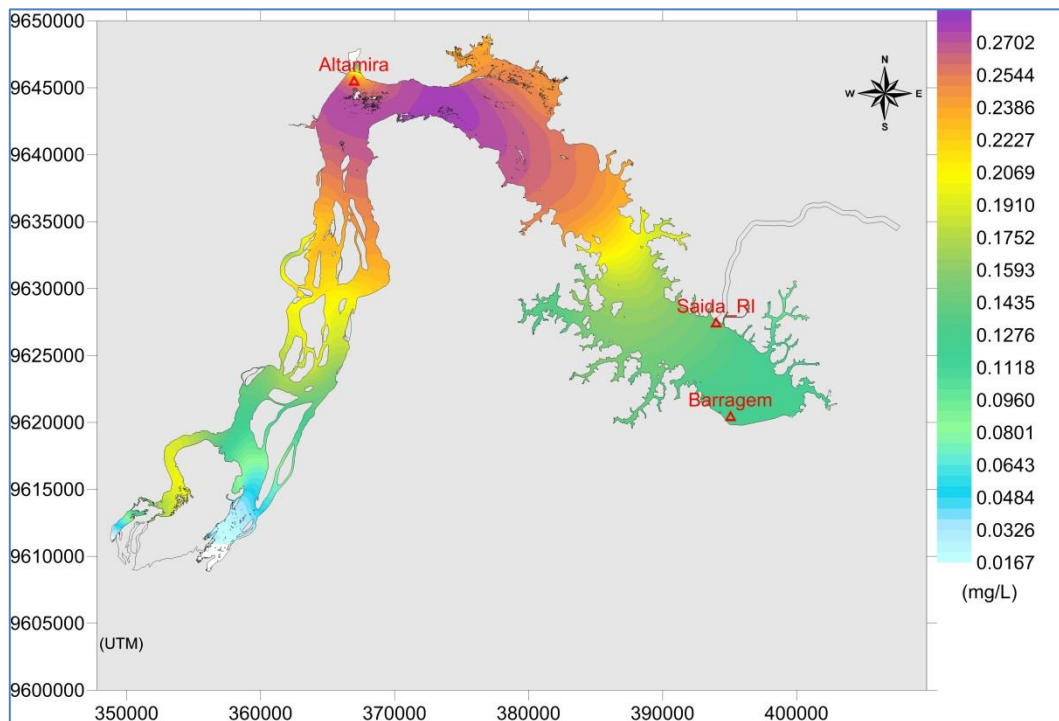
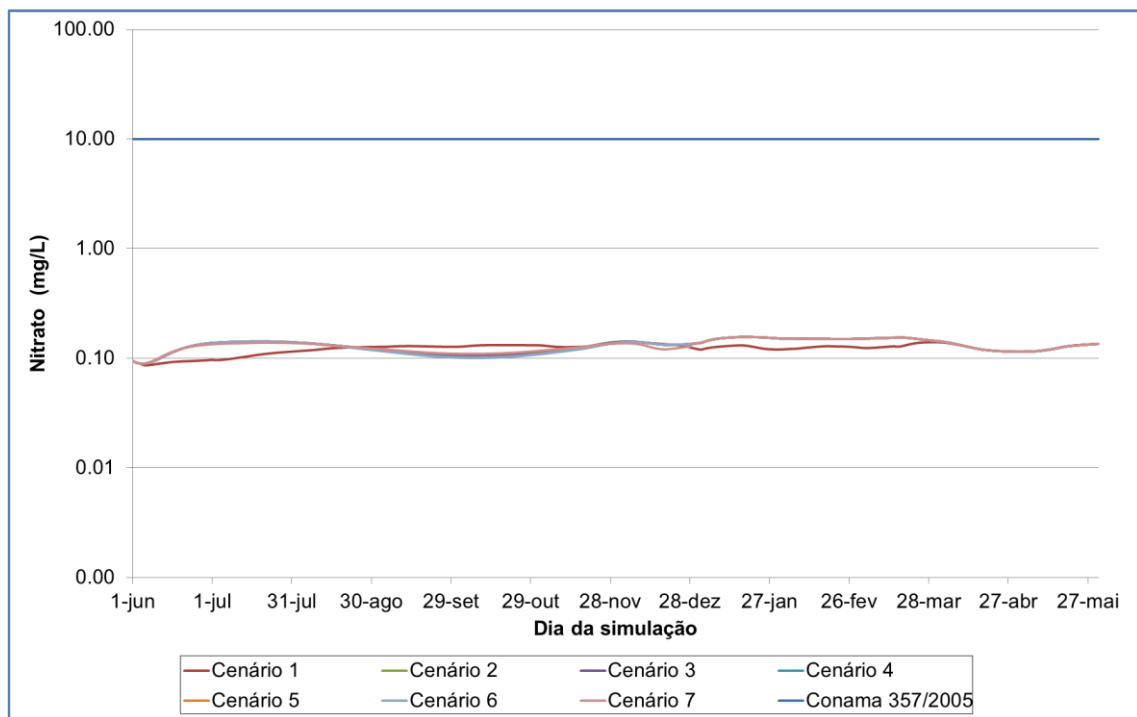


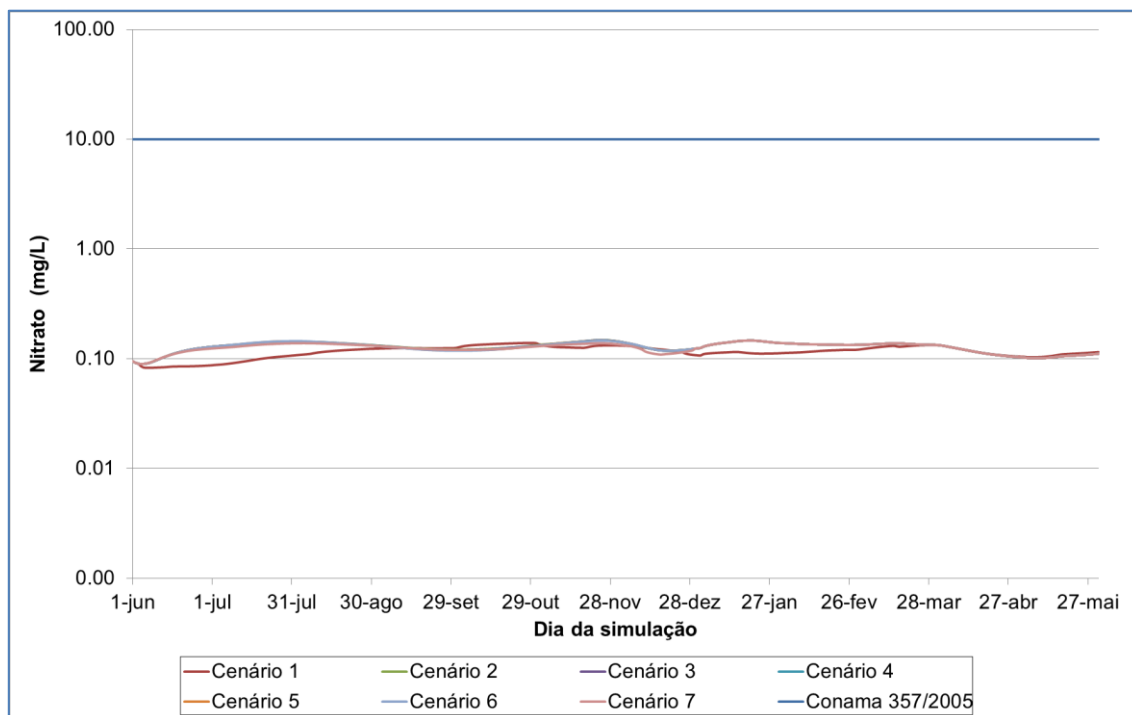
Figura 66: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.

#### 4.4.4. Resultados para Nitrato

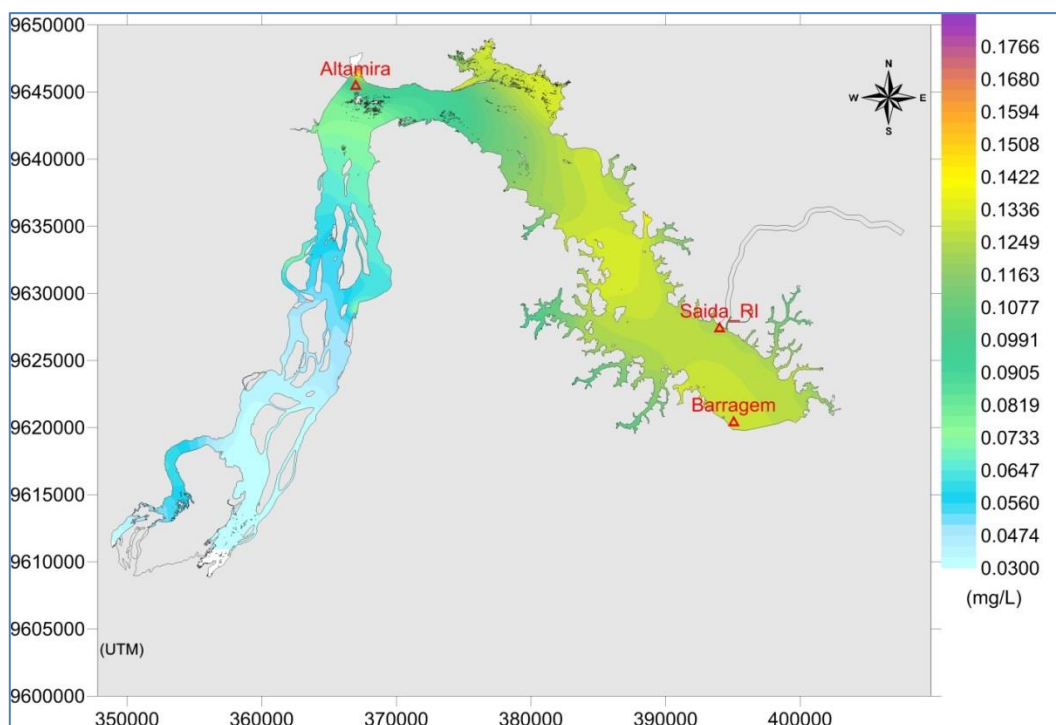
Para Nitrato, as evoluções temporais são apresentadas na Figura 67 e na Figura 68 (ambas em escala logarítmica). Em comparação com o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para Classe 2 – 10,0 mg/L – os valores simulados para esse parâmetro são baixos, não ultrapassando 0,18 mg/ e são praticamente constantes ao longo de todo o período simulado. O mesmo pode ser observado nas distribuições espaciais (Figura 69 até Figura 75) para o período de estiagem. Os valores maiores ocorrem entre Altamira e a Saída do RI, enquanto os menores ocorrem na região mais próxima à entrada do reservatório – de maneira geral, as concentrações ficam entre 0,03 e 0,20 mg/L, valores muito menores do que o estabelecido pela legislação.



**Figura 67: Evolução temporal das concentrações de Nitrato (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.**



**Figura 68: Evolução temporal das concentrações de Nitrato (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.**



**Figura 69: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**

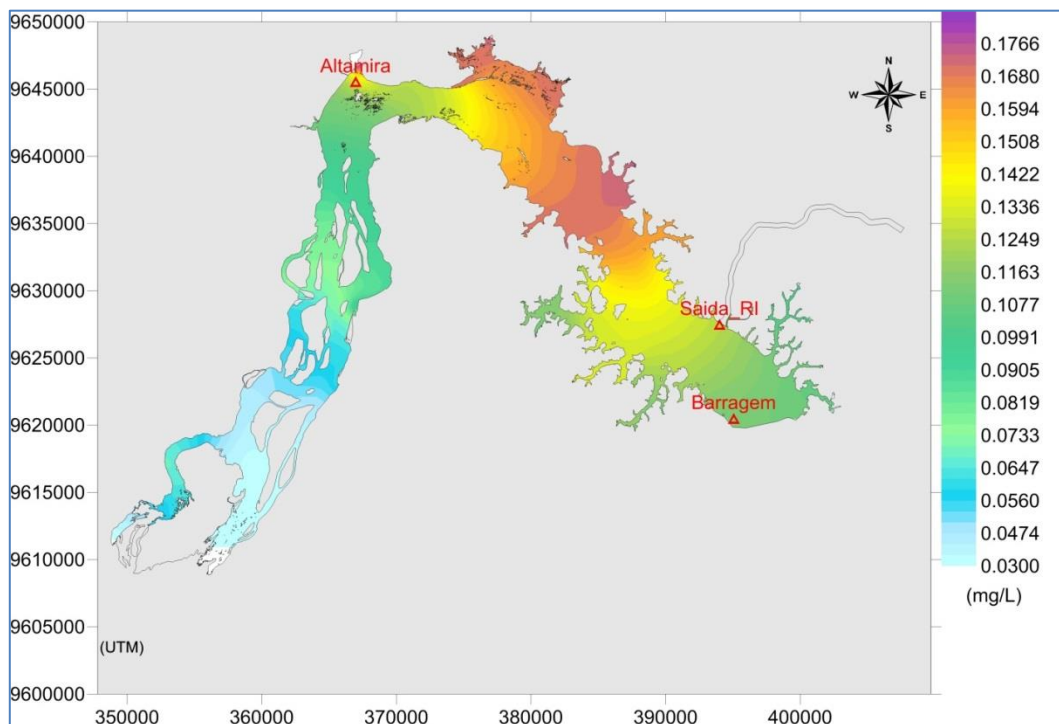


Figura 70: Distribuição espacial das concentrações de Nitrito no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.

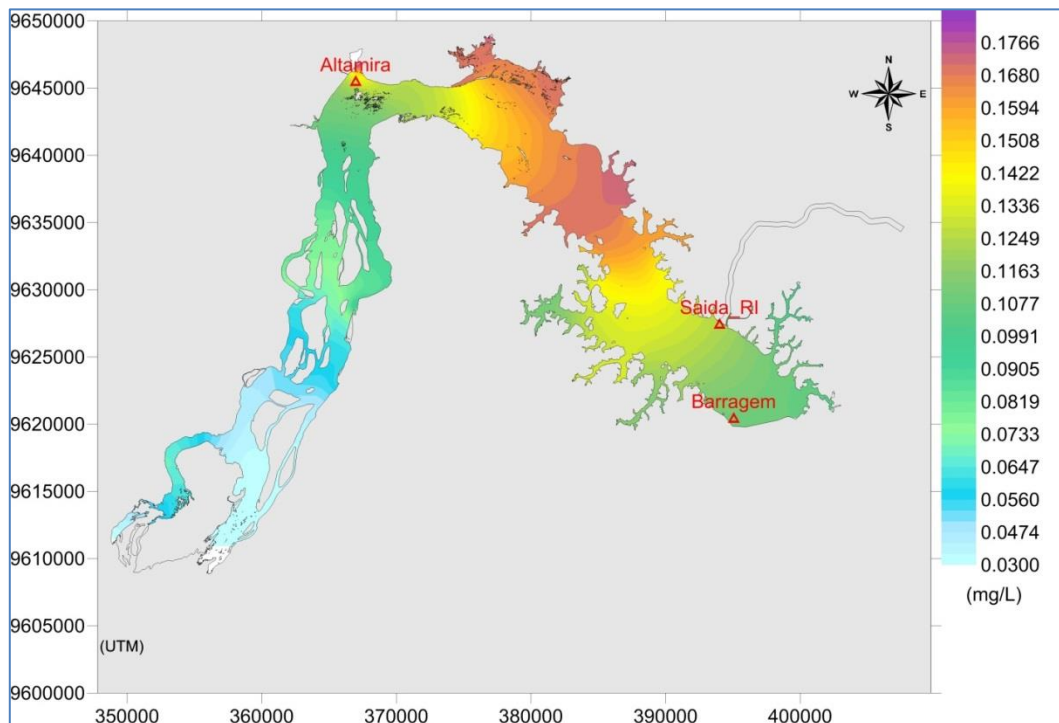
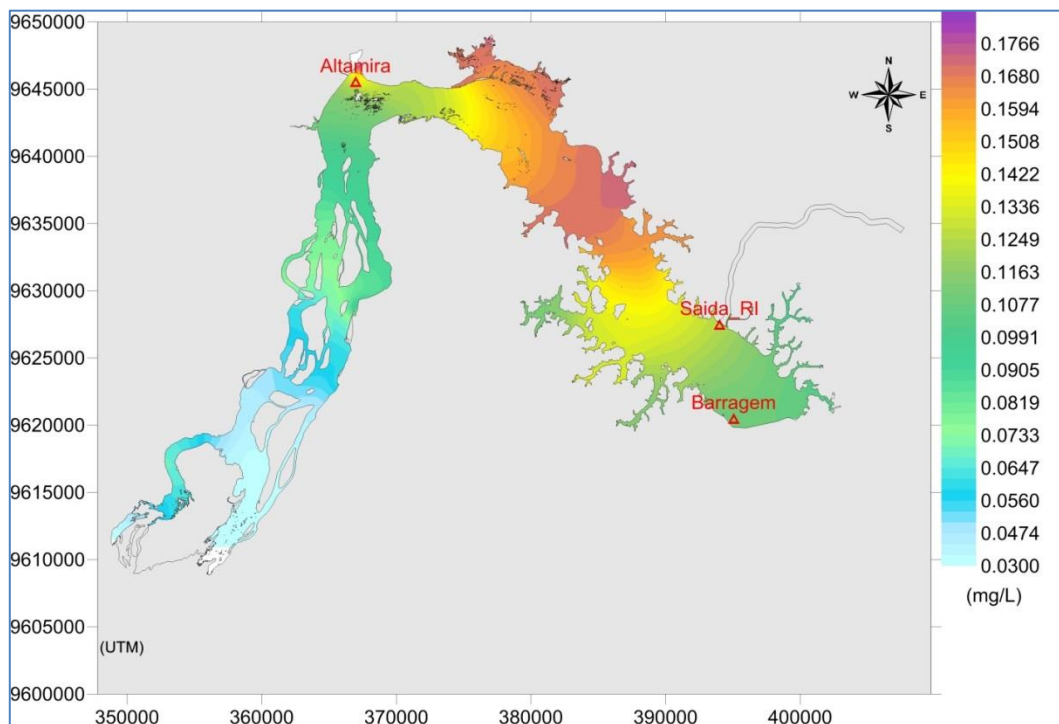
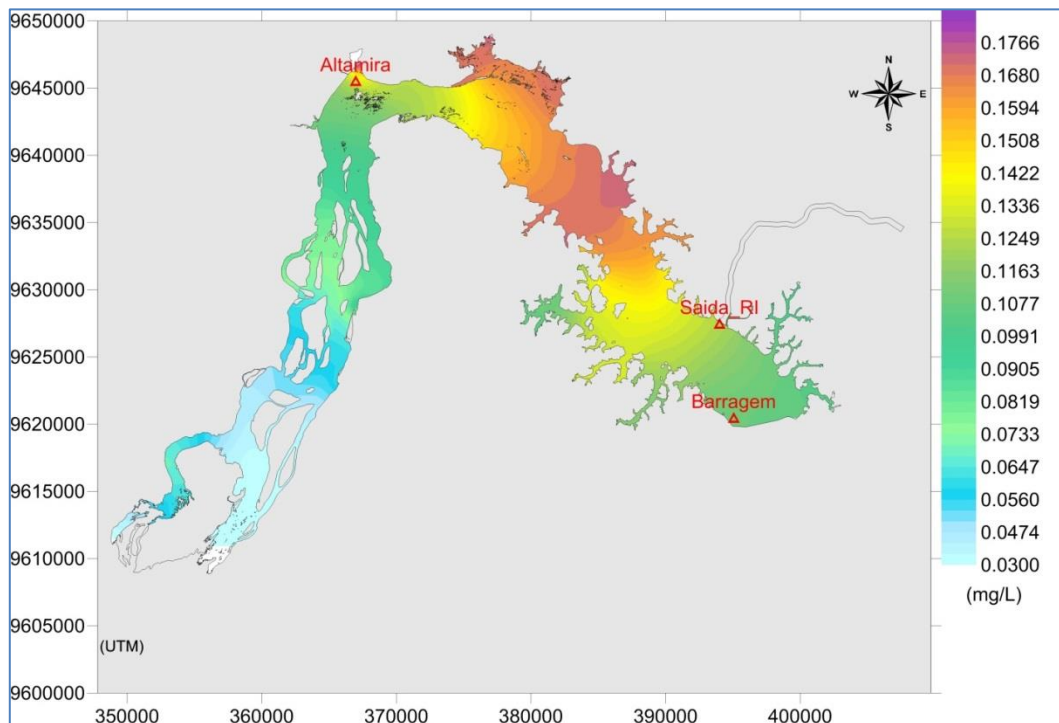


Figura 71: Distribuição espacial das concentrações de Nitrito no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.

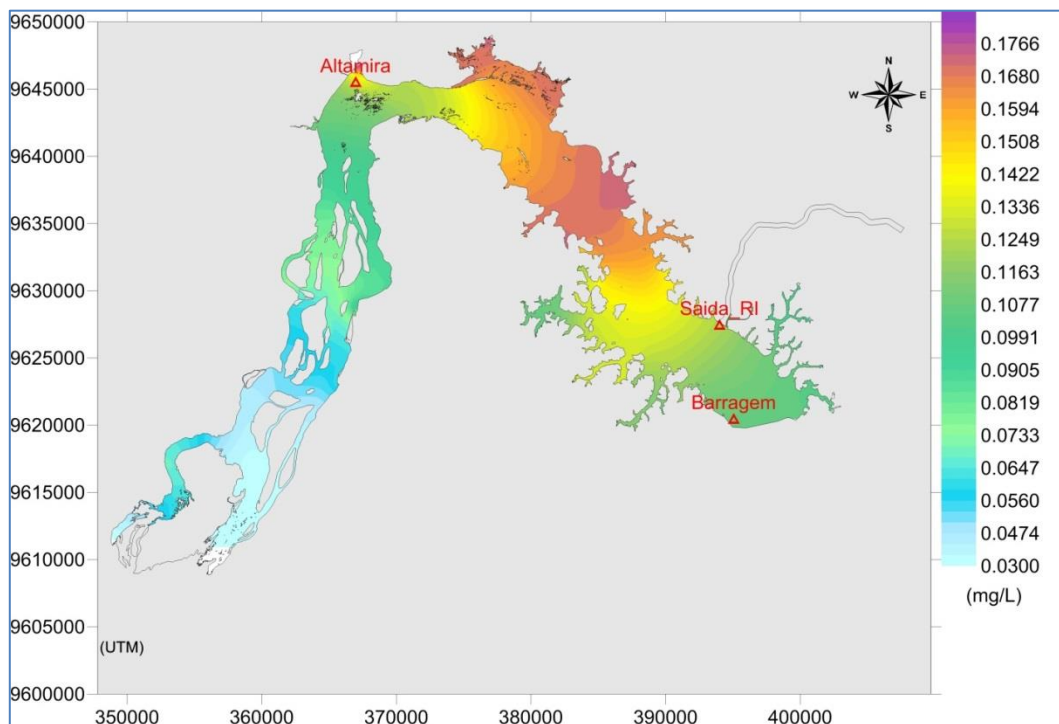




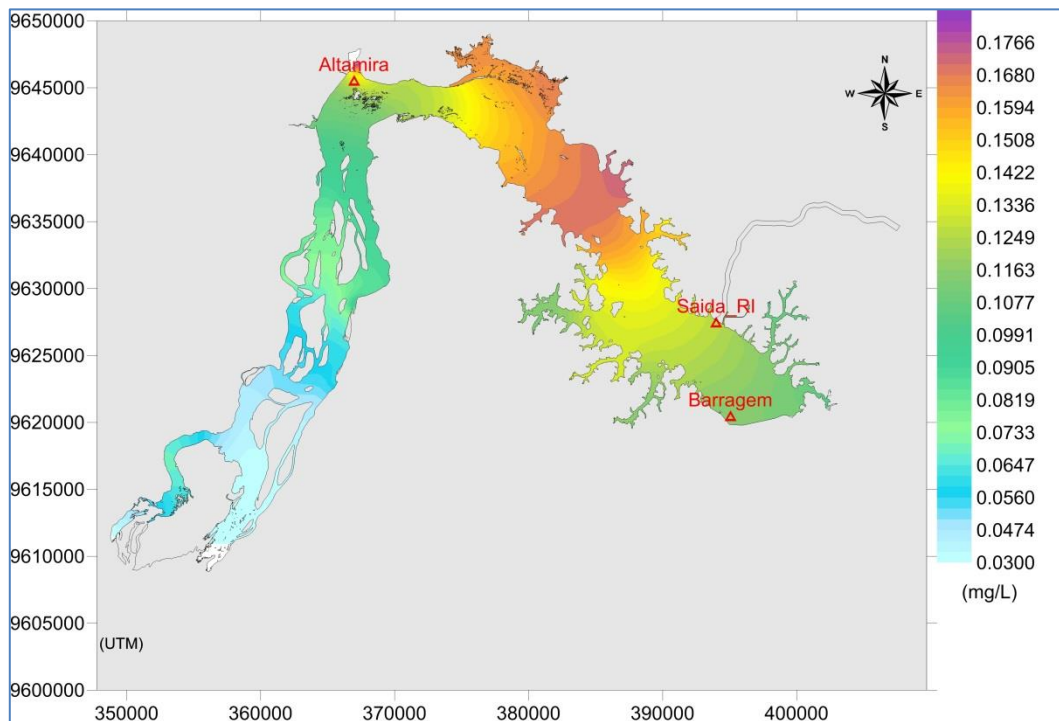
**Figura 72: Distribuição espacial das concentrações de Nitrito no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 73: Distribuição espacial das concentrações de Nitrito no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 74: Distribuição espacial das concentrações de Nitrito no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**

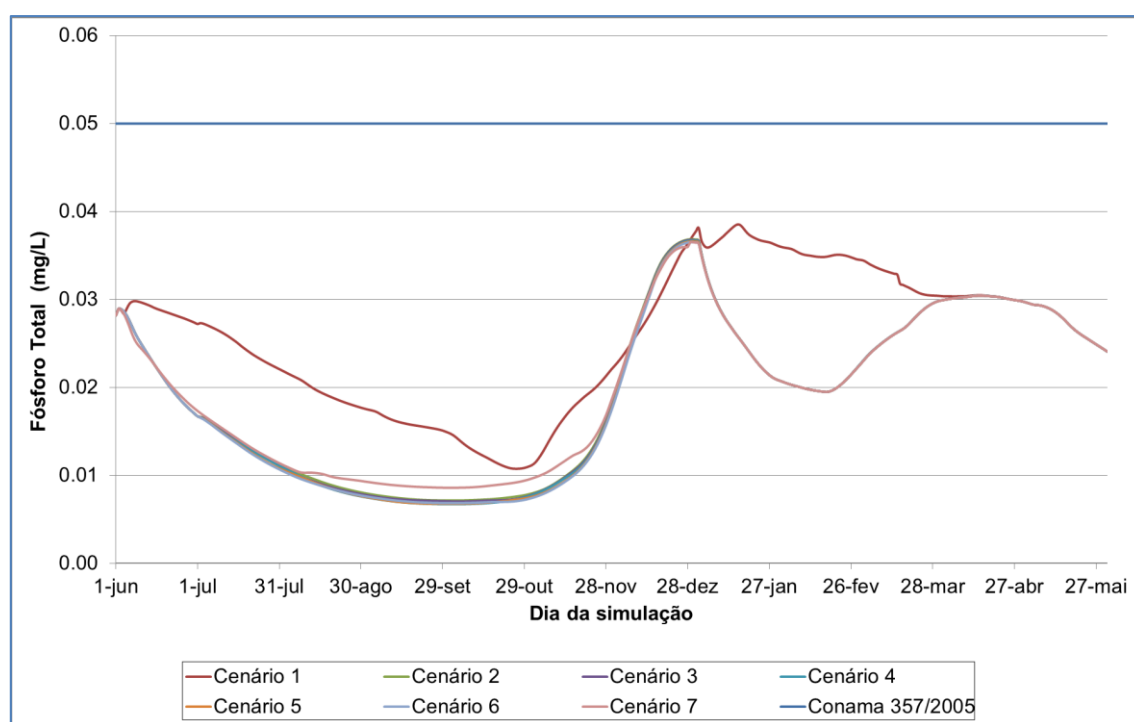


**Figura 75: Distribuição espacial das concentrações de Nitrito no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

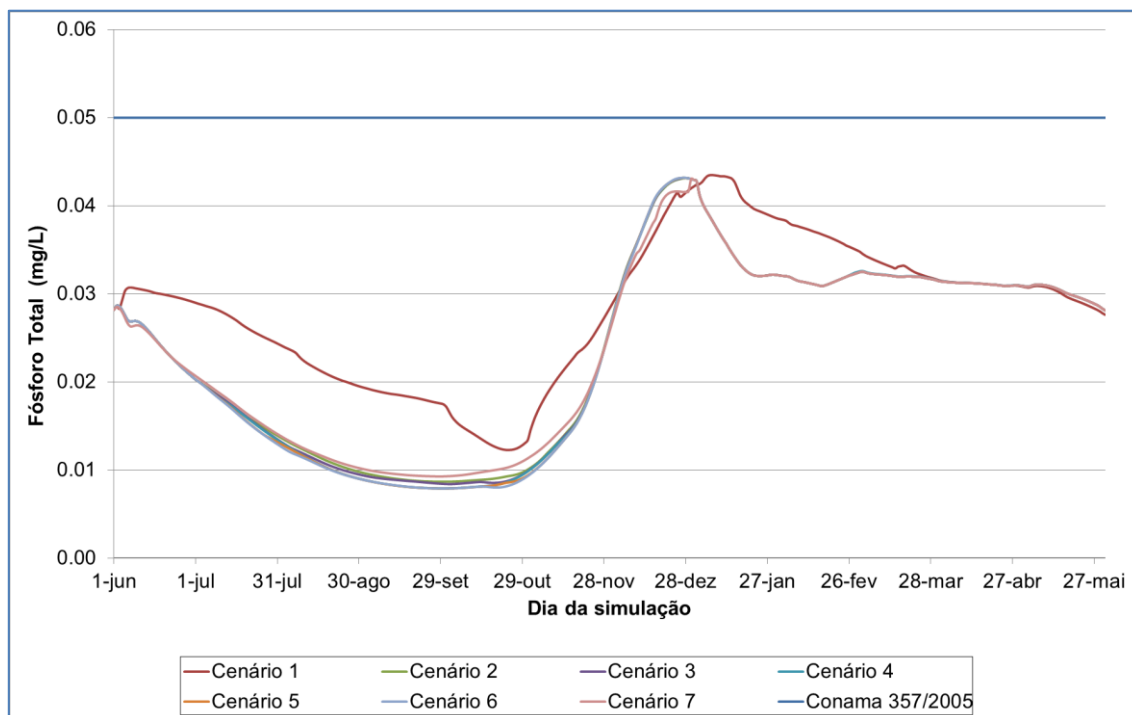
#### 4.4.5. Resultados para Fósforo Total

Para Fósforo Total, o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 é de 0,05 mg/L, considerando ambiente intermediário. Nas evoluções temporais, apresentadas na Figura 76 e na Figura 77, observa-se que os resultados das simulações estão abaixo desse valor, variando entre 0,005 e 0,035 mg/L.

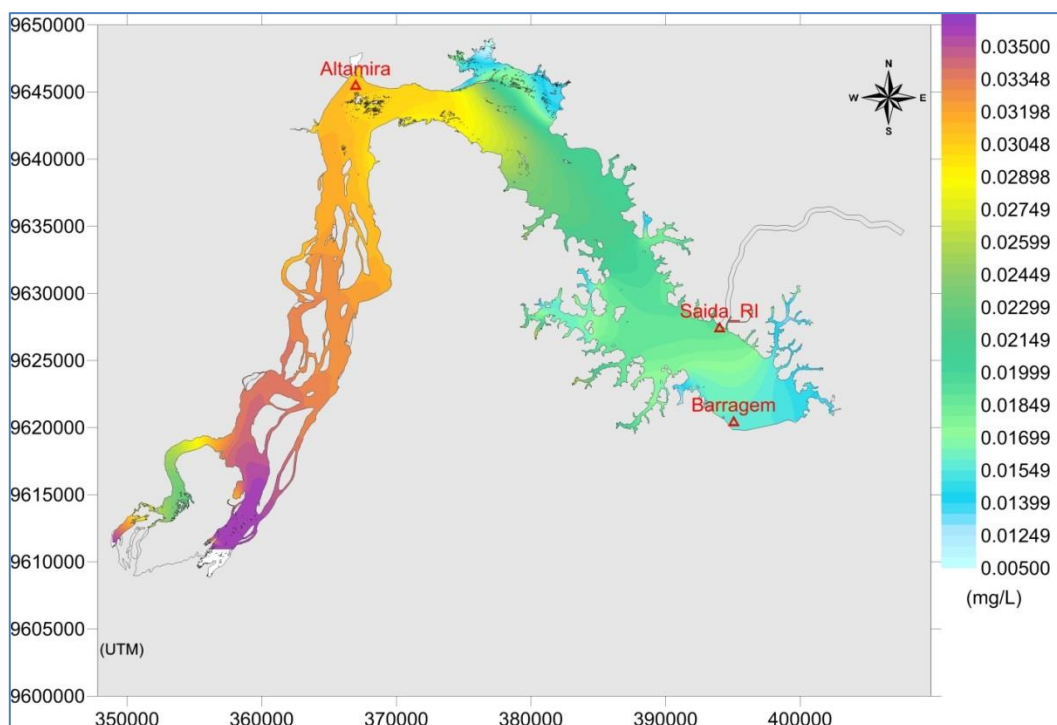
As distribuições espaciais para o período de estiagem (Figura 78 até Figura 84) são muito parecidas em todos os cenários. As maiores concentrações ocorrem próximo à entrada do reservatório – estes são da ordem 0,035 mg/L, e devem-se aos valores utilizados para a condição de contorno nesse ponto. Na região da barragem, os valores das concentrações de Fósforo Total são mais baixos, ficando em torno de 0,005 mg/L. Sendo assim, é possível afirmar, que nas condições utilizadas nas simulações de qualidade da água do Reservatório do Xingu, não há problemas de qualidade da água em termos de Fósforo Total.



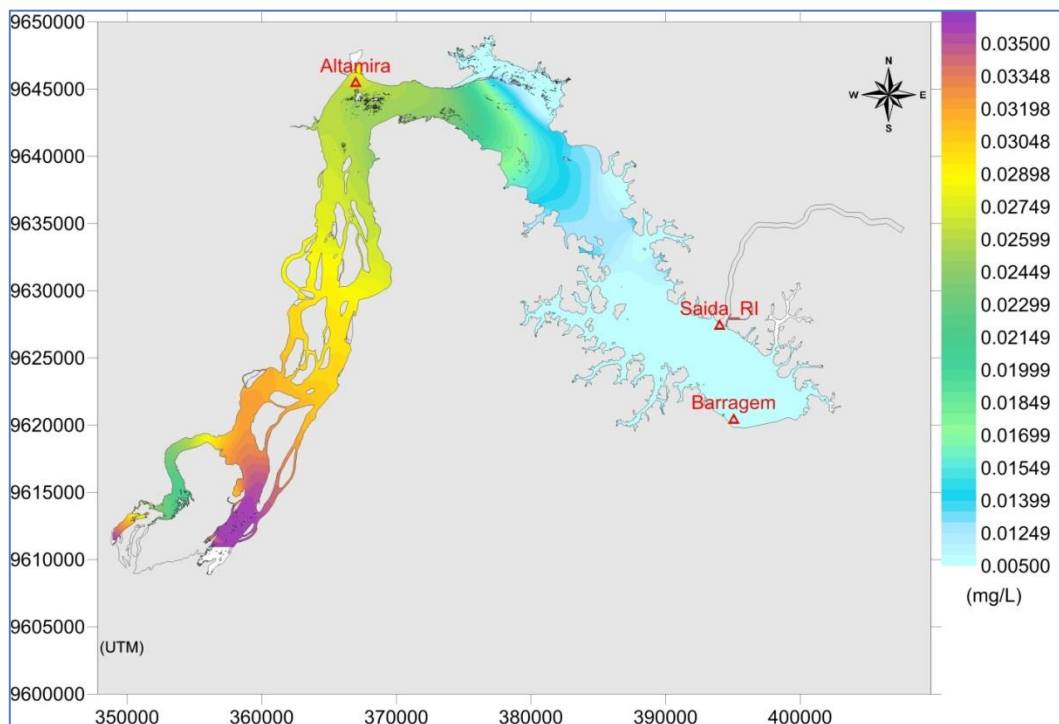
**Figura 76: Evolução temporal das concentrações de Fósforo Total (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.**



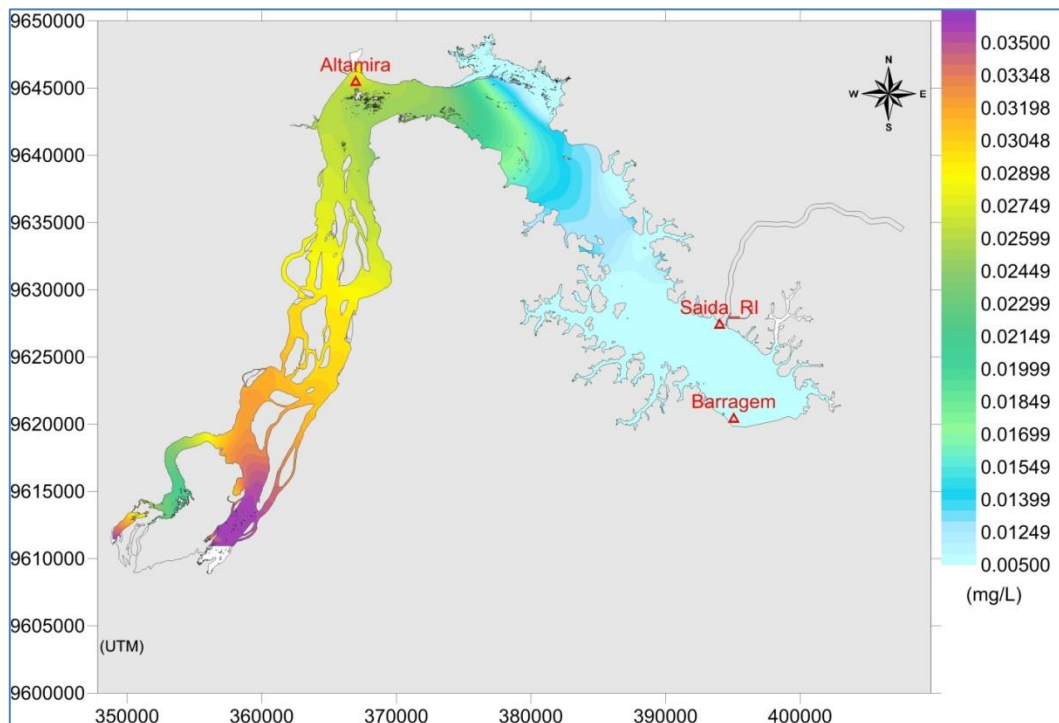
**Figura 77: Evolução temporal das concentrações de Fósforo Total (mg/L) na saída do Reservatório do Xingu, e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.**



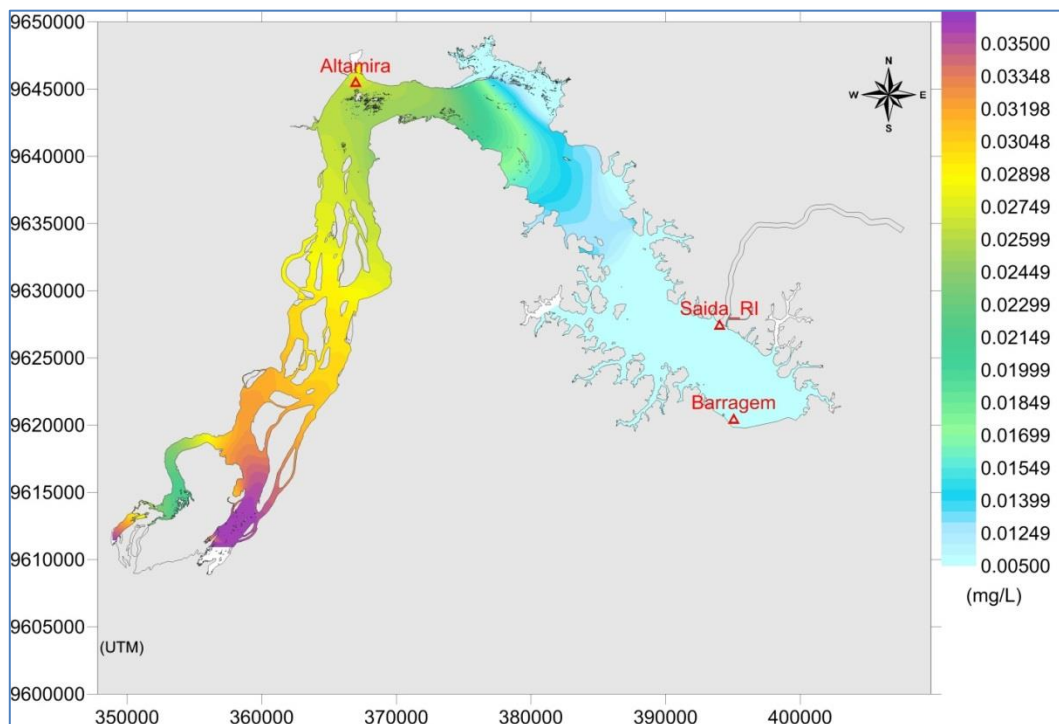
**Figura 78: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



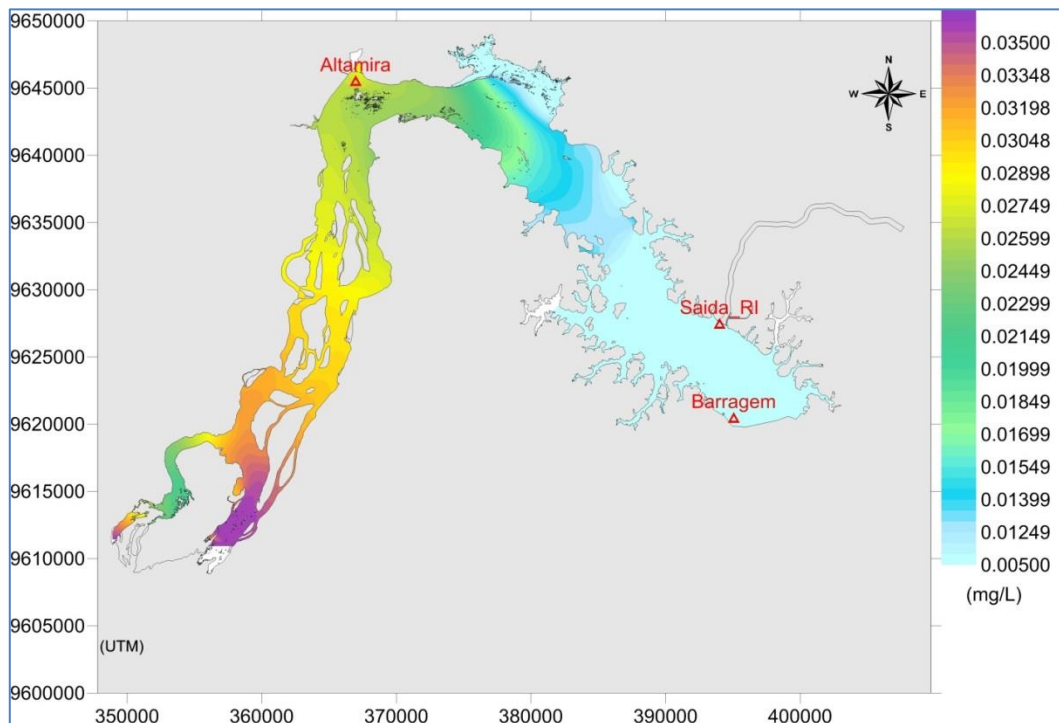
**Figura 79: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



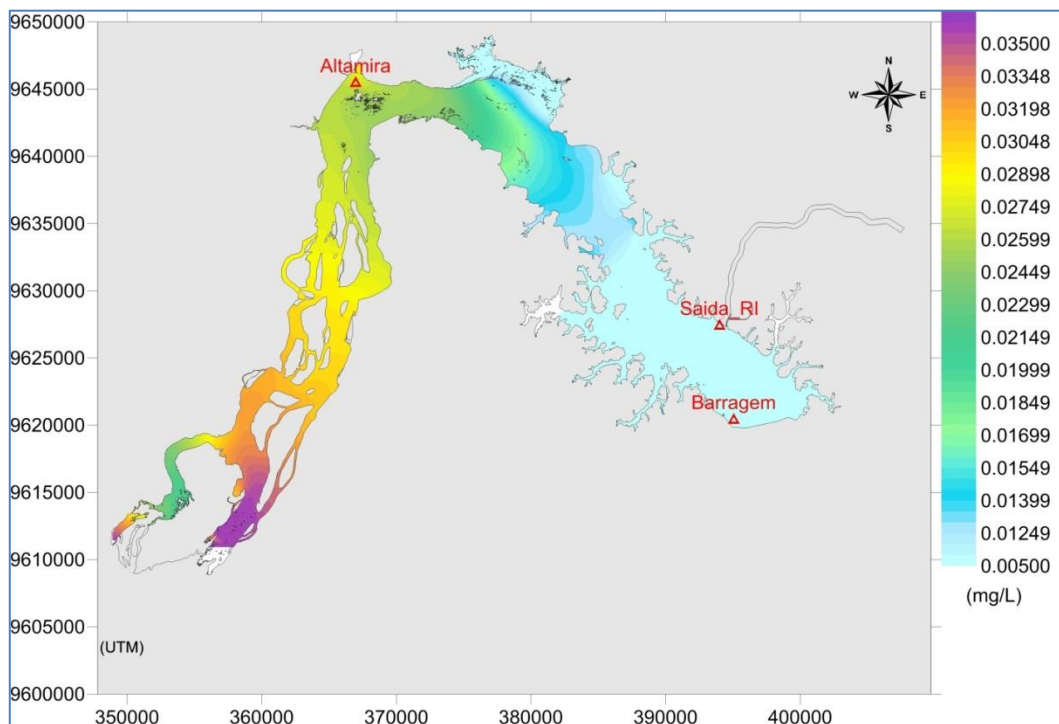
**Figura 80: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



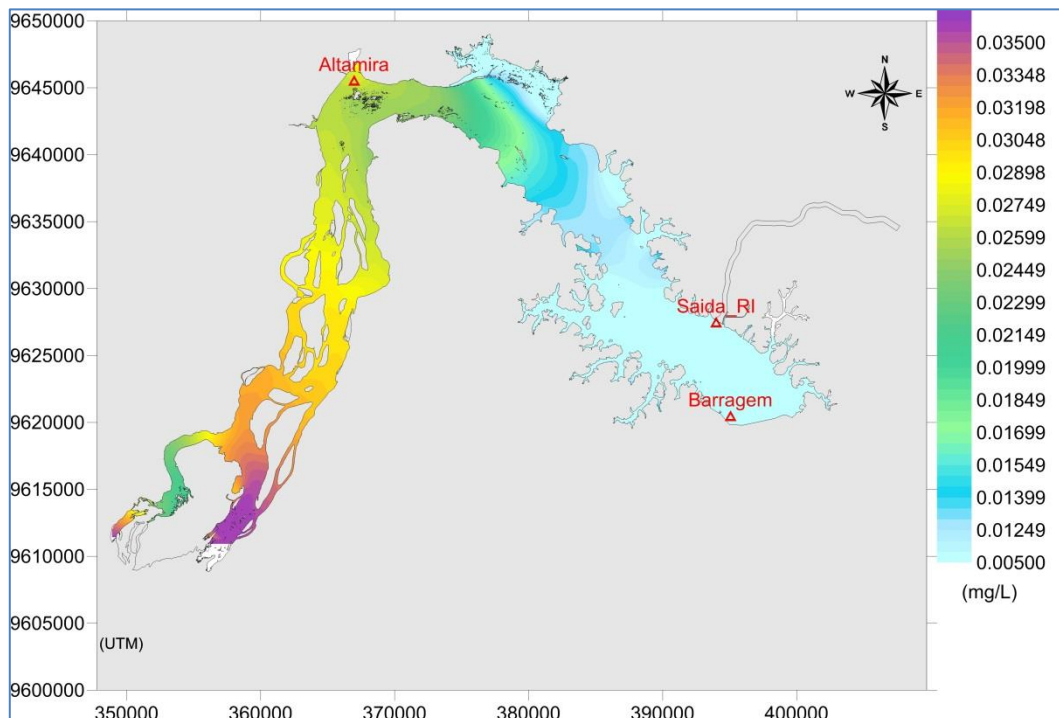
**Figura 81: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 82: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



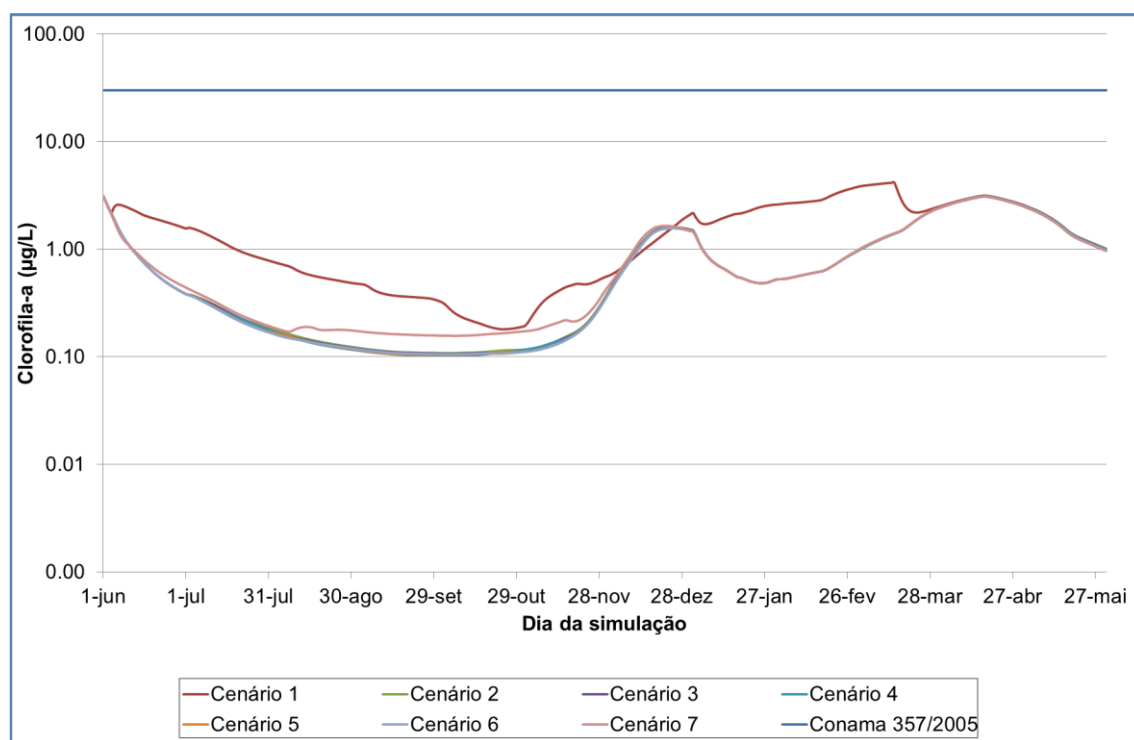
**Figura 83: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



**Figura 84: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

#### 4.4.6. Resultados para Clorofila-a

Para Clorofila-a, o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 é de 30,0 µg/L. Nas evoluções temporais, apresentadas na Figura 85 e na Figura 86, observa-se que as concentrações não ultrapassam 6,0 µg/L. As distribuições espaciais para o período de estiagem são apresentadas da Figura 87 até a Figura 93; as diferenças entre as distribuições espaciais das concentrações de Clorofila-a são bastante sutis, tanto no espaço quanto em termos de amplitude. As maiores concentrações são observadas na região mais a montante do reservatório e devem-se à condição de contorno utilizada; concentrações menores são observadas na região da barragem.



**Figura 85: Evolução temporal das concentrações de Clorofila-a (µg/L) na saída do Reservatório do Xingu (Barragem), e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.**



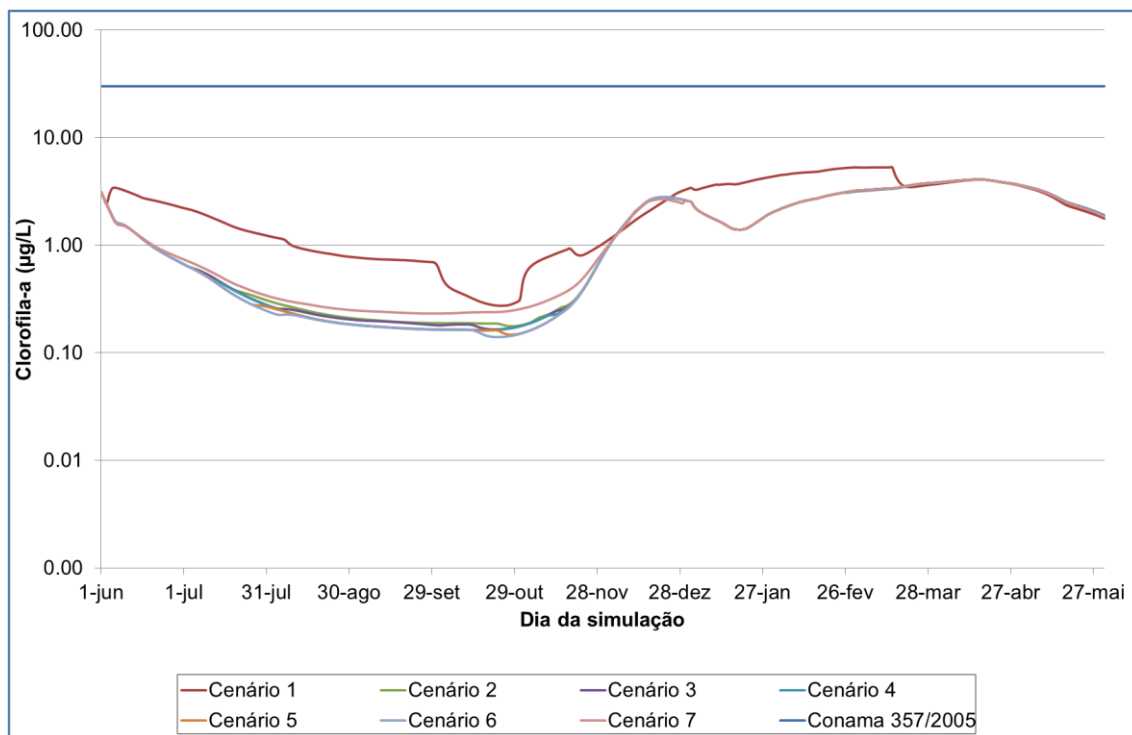


Figura 86: Evolução temporal das concentrações de Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) na saída do Reservatório do Xingu (Entrada do RI), e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.

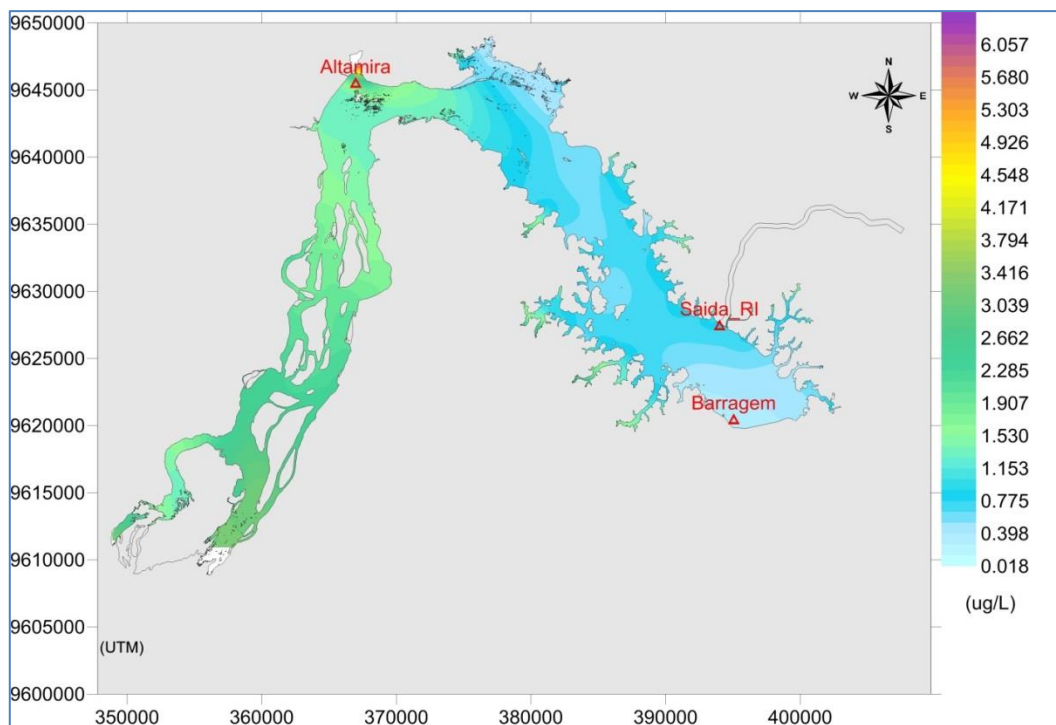
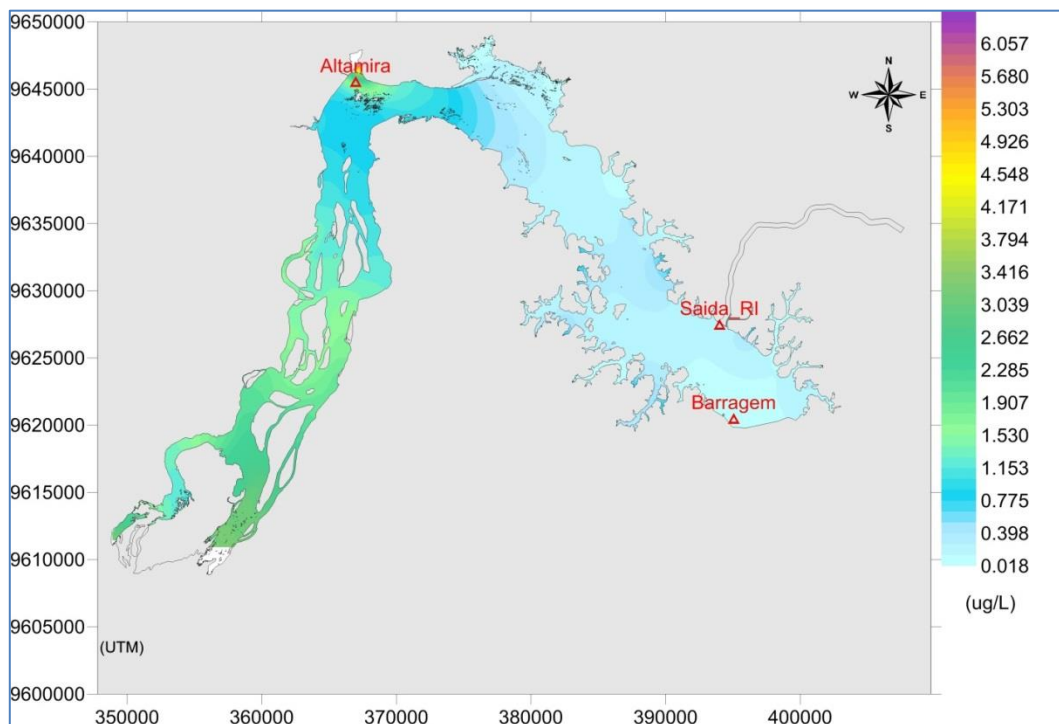
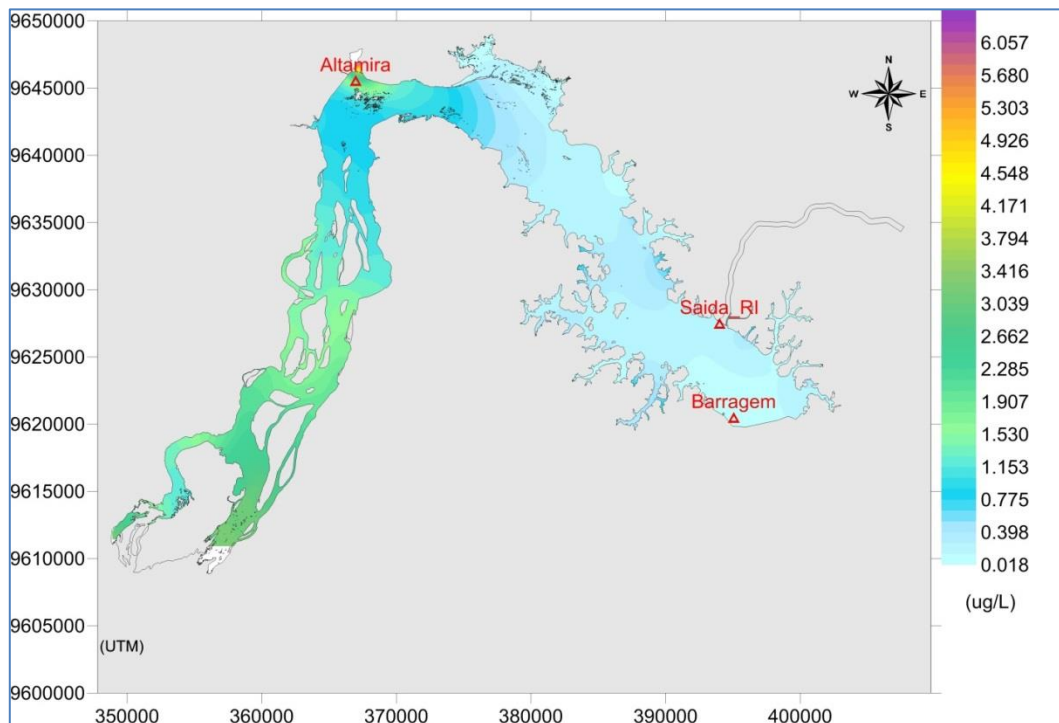


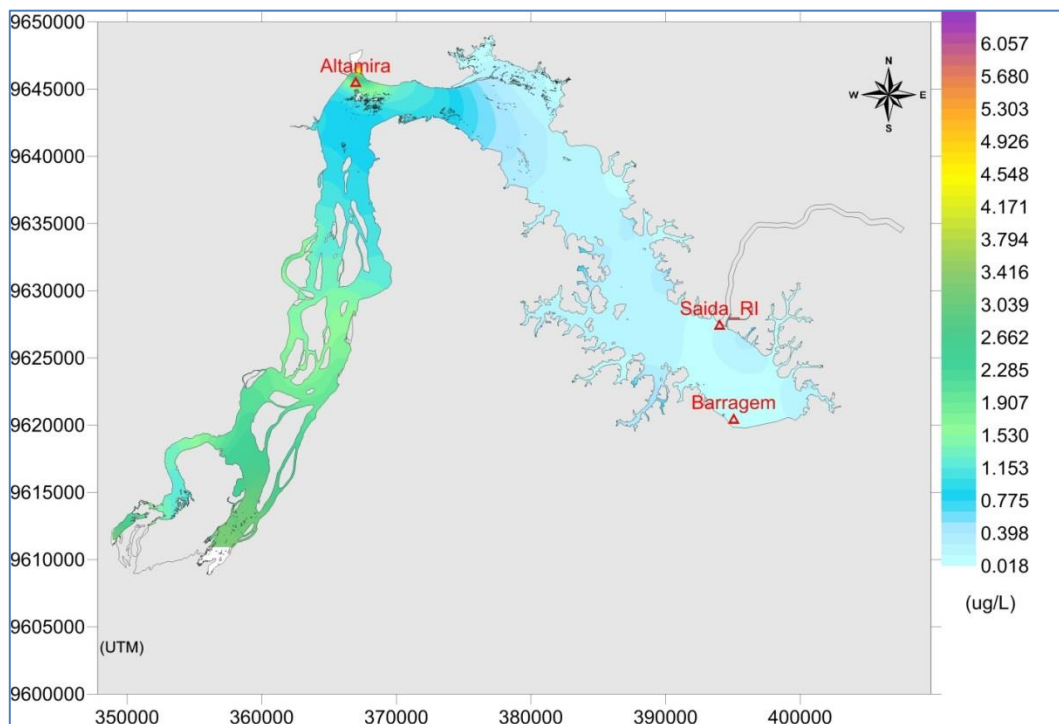
Figura 87: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.



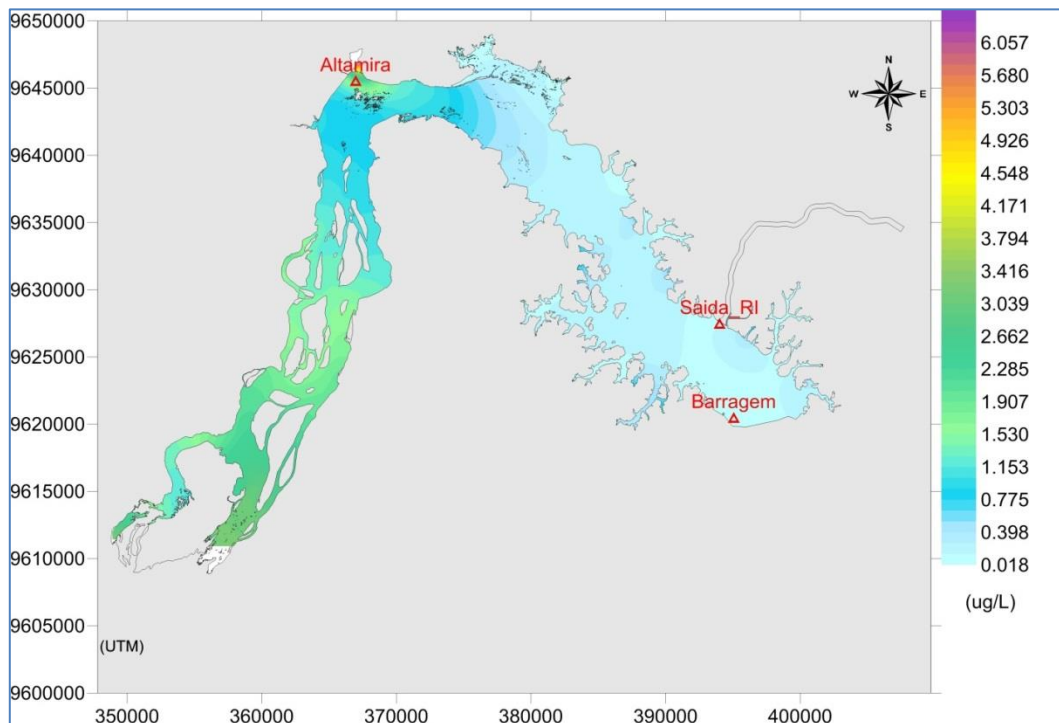
**Figura 88: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



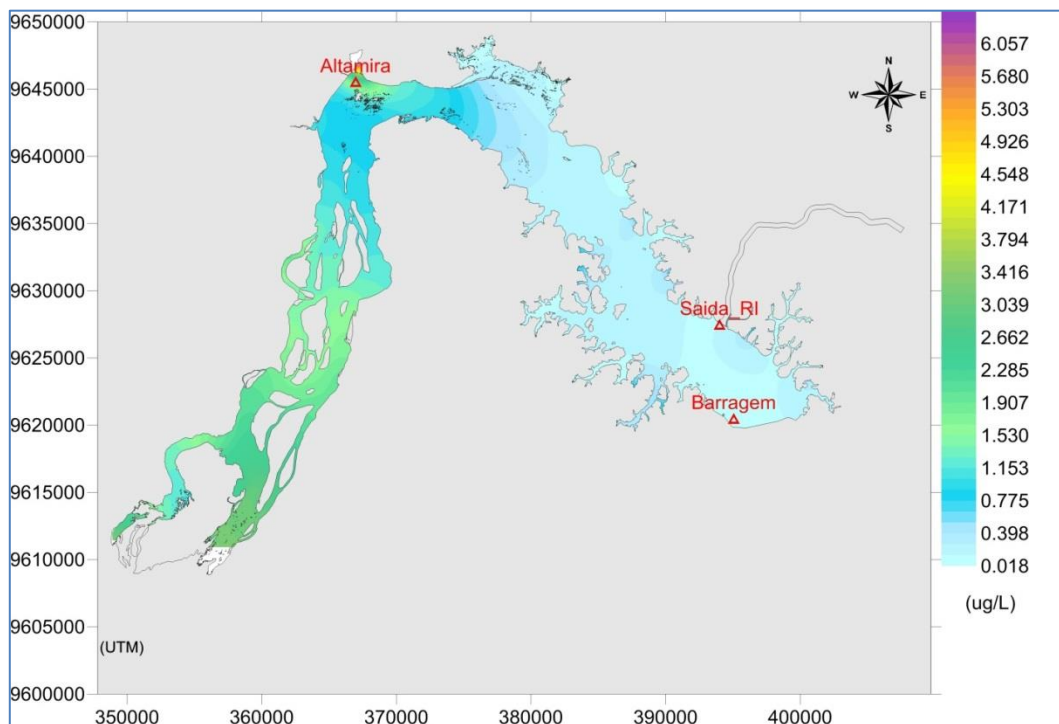
**Figura 89: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



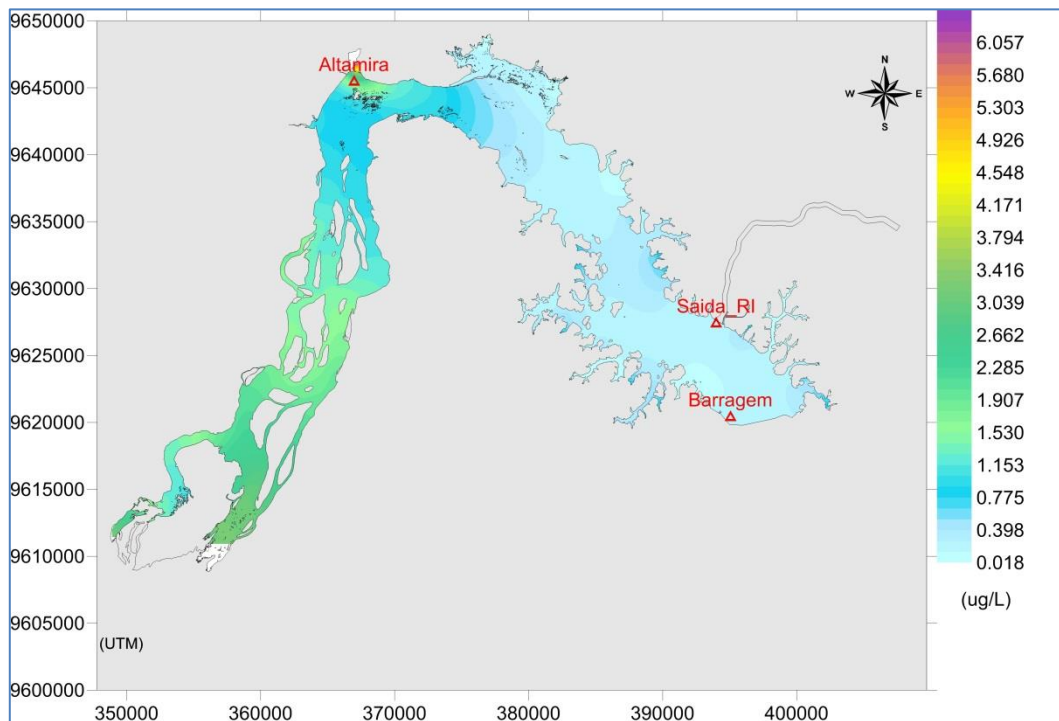
**Figura 90: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 91: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



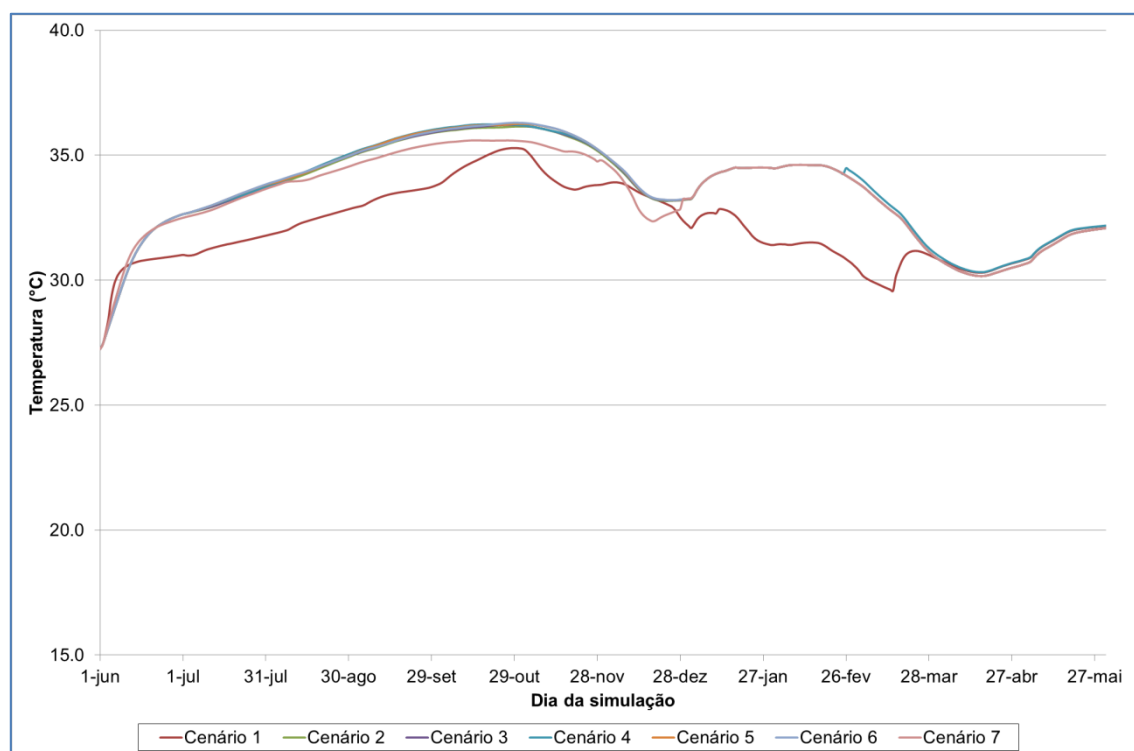
**Figura 92: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



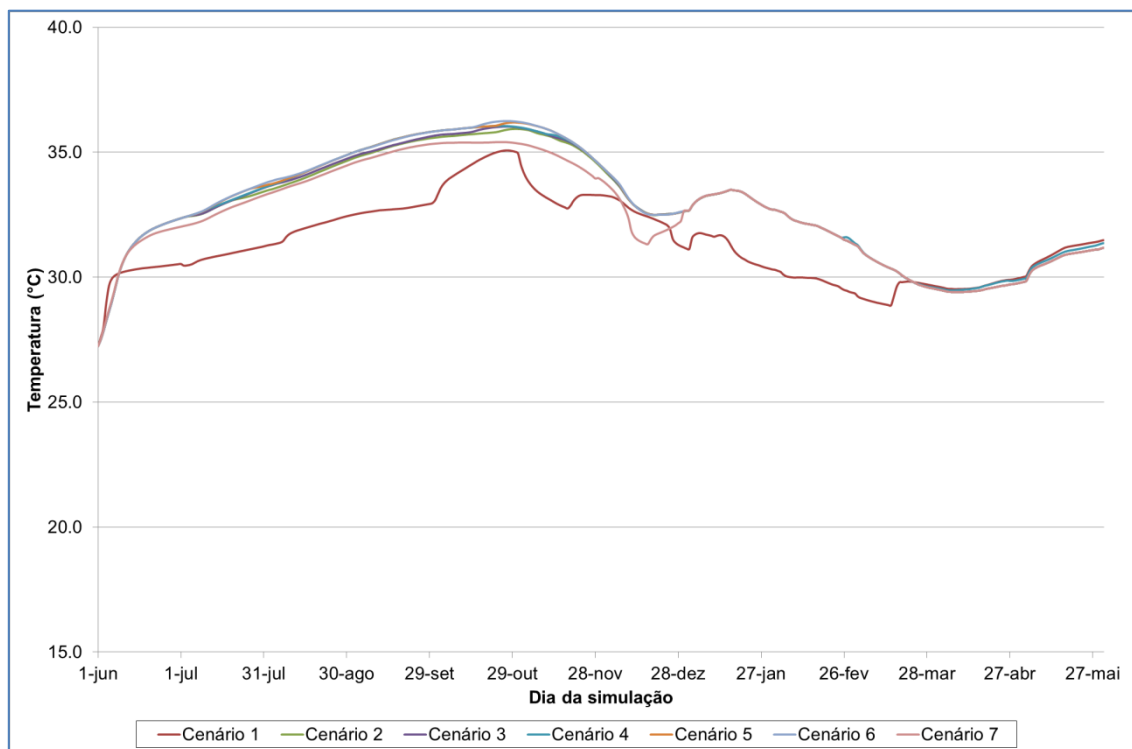
**Figura 93: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

#### 4.4.7. Resultados para Temperatura

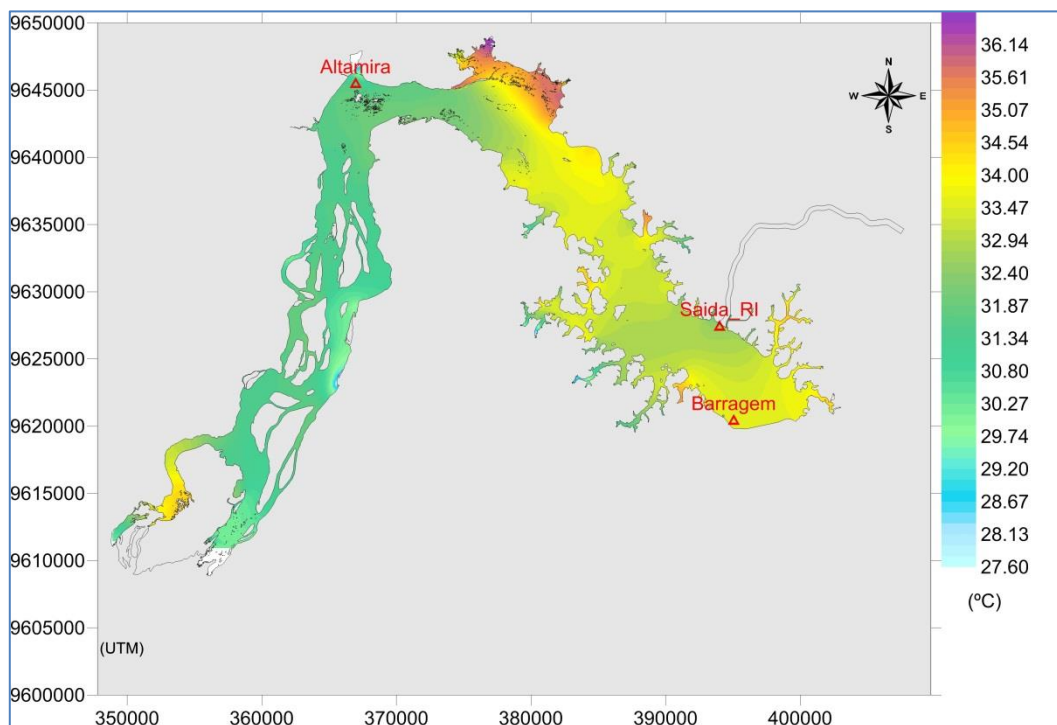
Para as temperaturas, as séries temporais para os pontos Barragem e Saída do RI são apresentadas na Figura 94 e na Figura 95, respectivamente. Em ambos os pontos a variação da temperatura fica entre 27,5°C e 36°C. Assim como para as outras variáveis, as distribuições espaciais para o período de estiagem são bastante semelhantes – estas são apresentadas da Figura 96 até a Figura 102. Temperaturas maiores são observadas nas regiões menos profundas (braços e reentrâncias do reservatório).



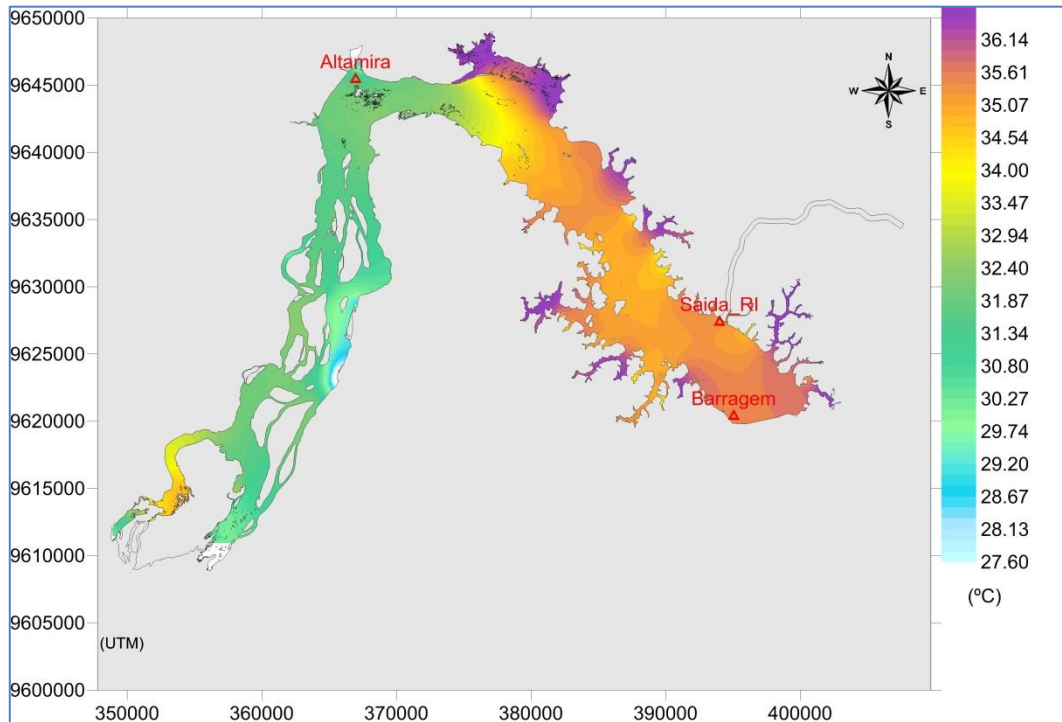
**Figura 94: Evolução temporal das temperaturas da água na saída do Reservatório do Xingu, e entrada no Trecho de Vazão Reduzida.**



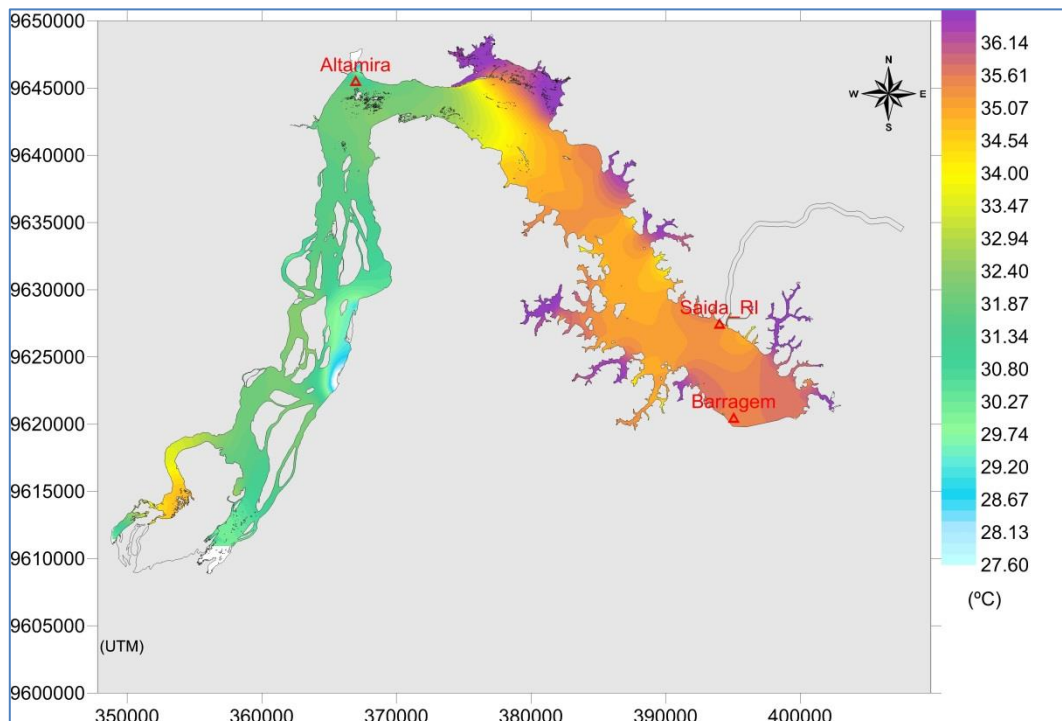
**Figura 95: Evolução temporal das temperaturas da água na saída do Reservatório do Xingu, e entrada para o Reservatório Intermediário através do Canal de Derivação.**



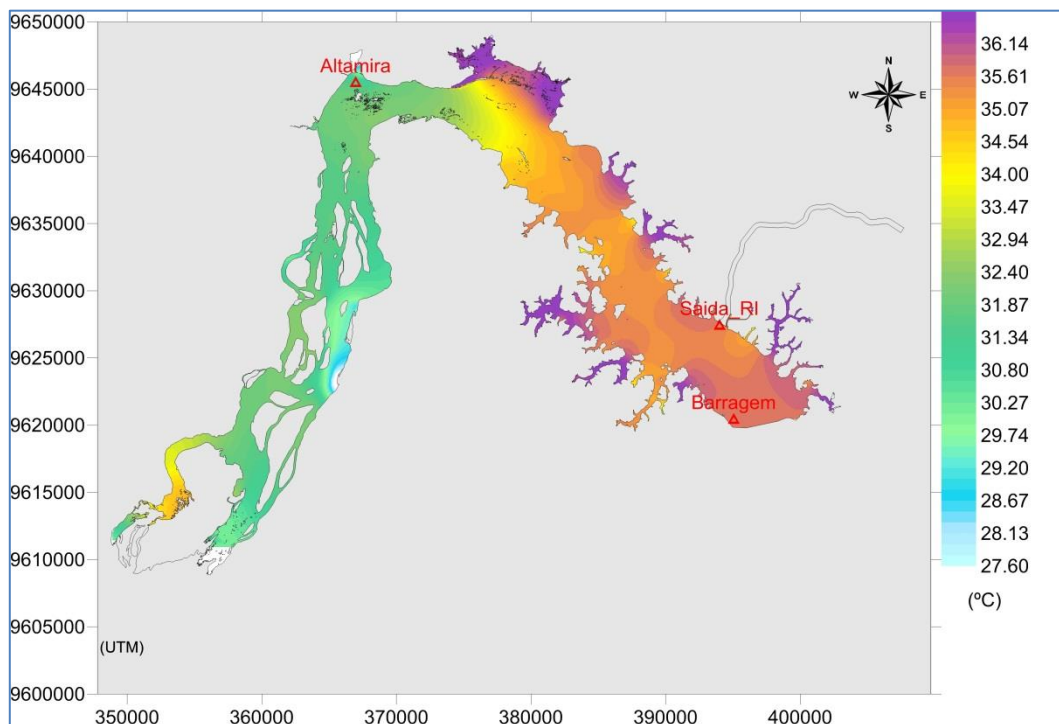
**Figura 96: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



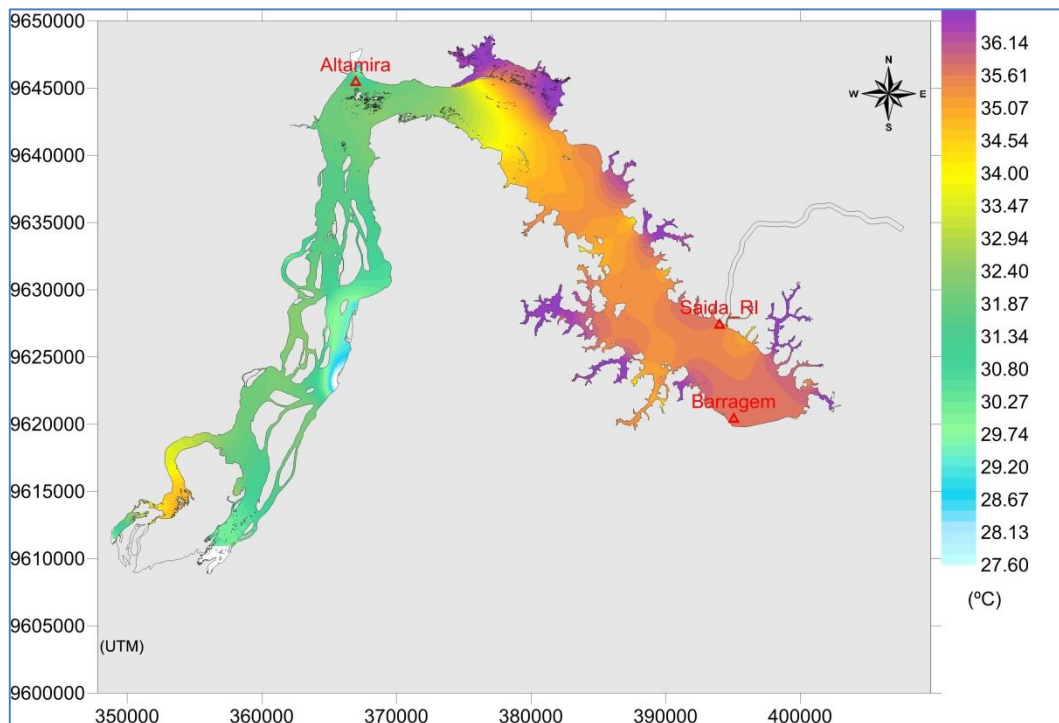
**Figura 97: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



**Figura 98: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**

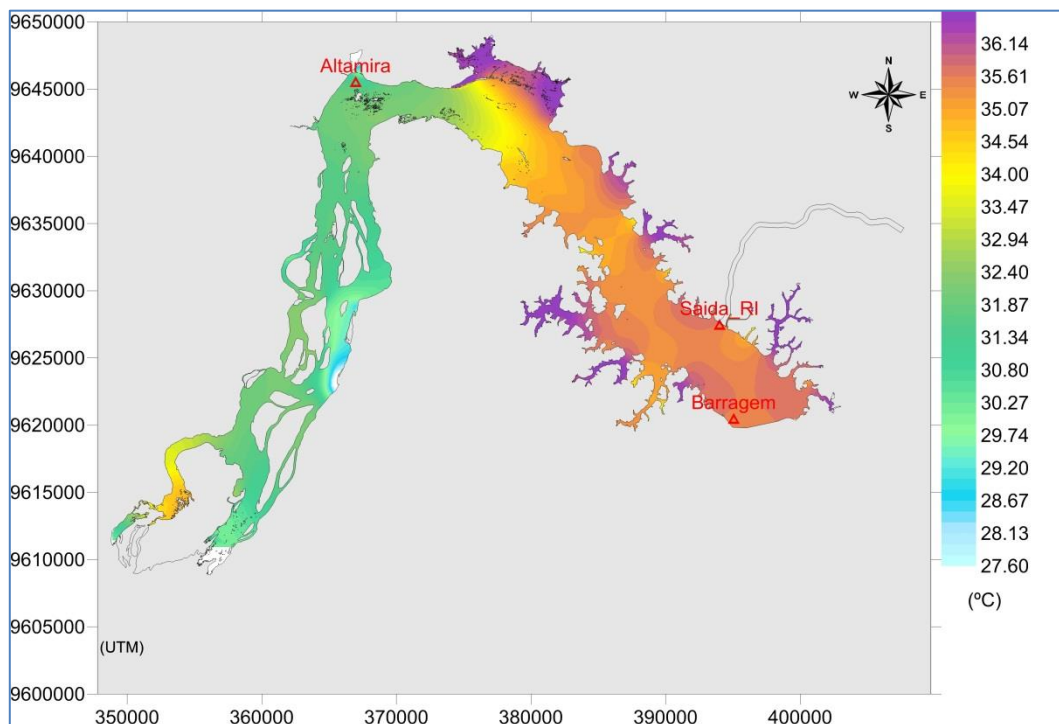


**Figura 99: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**

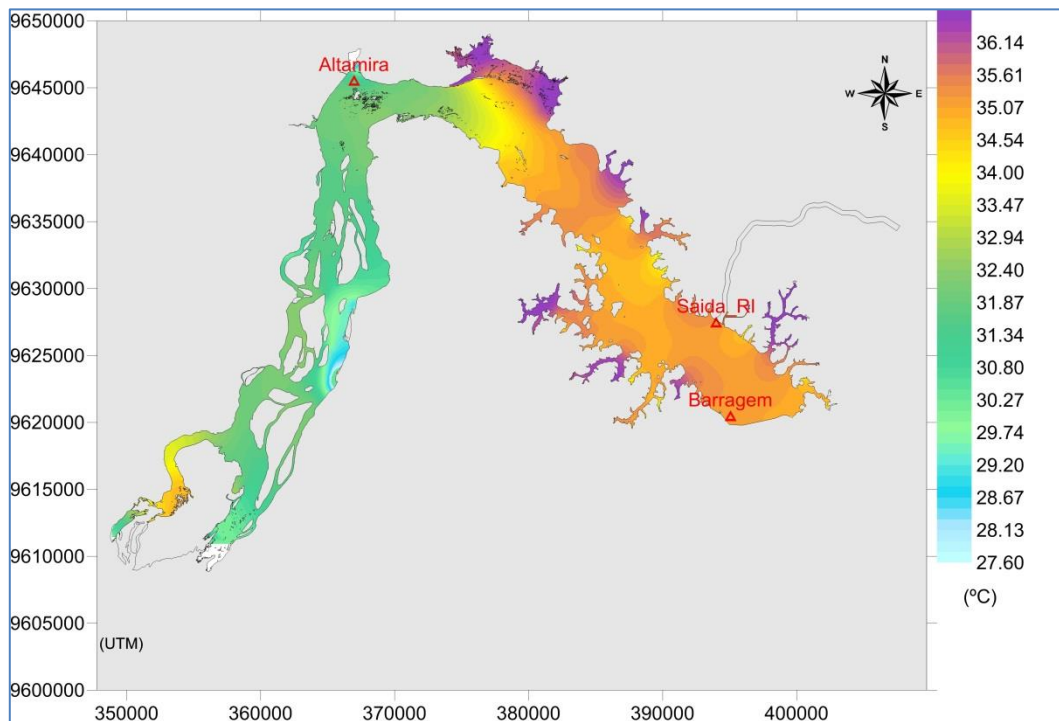


**Figura 100: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**





**Figura 101: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



**Figura 102: Distribuição espacial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

## 5. MODELAGENS MATEMÁTICAS DO RESERVATÓRIO INTERMEDIÁRIO (RI)

As simulações para o Reservatório Intermediário foram realizadas utilizando o modelo Delft3D<sup>®</sup>, descrito na seção 2.2. No presente capítulo são apresentadas as formas de implementação e os resultados para simulações de hidrodinâmica e de qualidade da água, incluindo o estudo da estratificação térmica do RI.

### 5.1. Implementação das simulações de hidrodinâmica

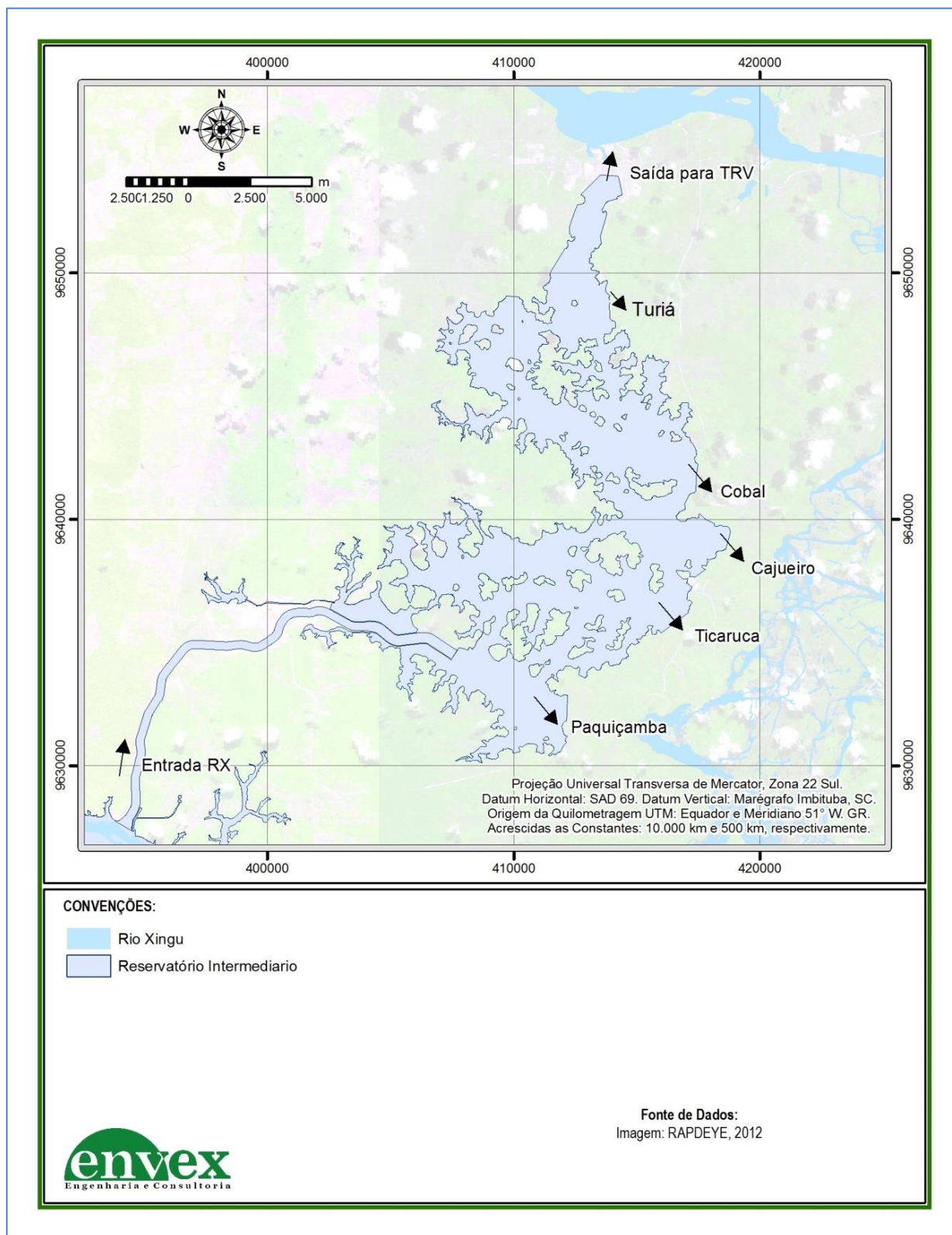
O domínio de interesse cobre a área do Reservatório Intermediário, com destaque para o ponto de entrada, que irá conectá-lo com o Reservatório do Xingu, e o ponto de saída, onde a água que será turbinada voltará ao rio Xingu após a Volta Grande do Xingu (TVR). Assim, para fins de modelagem, os dois reservatórios estão conectados por meio da imposição de condições de contorno originadas no Reservatório do Xingu.

Um mapa caracterizando o domínio de modelagem é mostrado na Figura 103. Nesse mapa são destacados os diques instalados no reservatório cuja função é manter as vazões dos igarapés que afluem para a região do TVR. As vazões vertidas nestes diques são muito pequenas (em comparação com as vazões do rio Xingu), porém importantes na manutenção destes igarapés localizados a jusante do Reservatório Intermediário. A partir da definição do domínio de modelagem foram desenvolvidas as seguintes atividades:

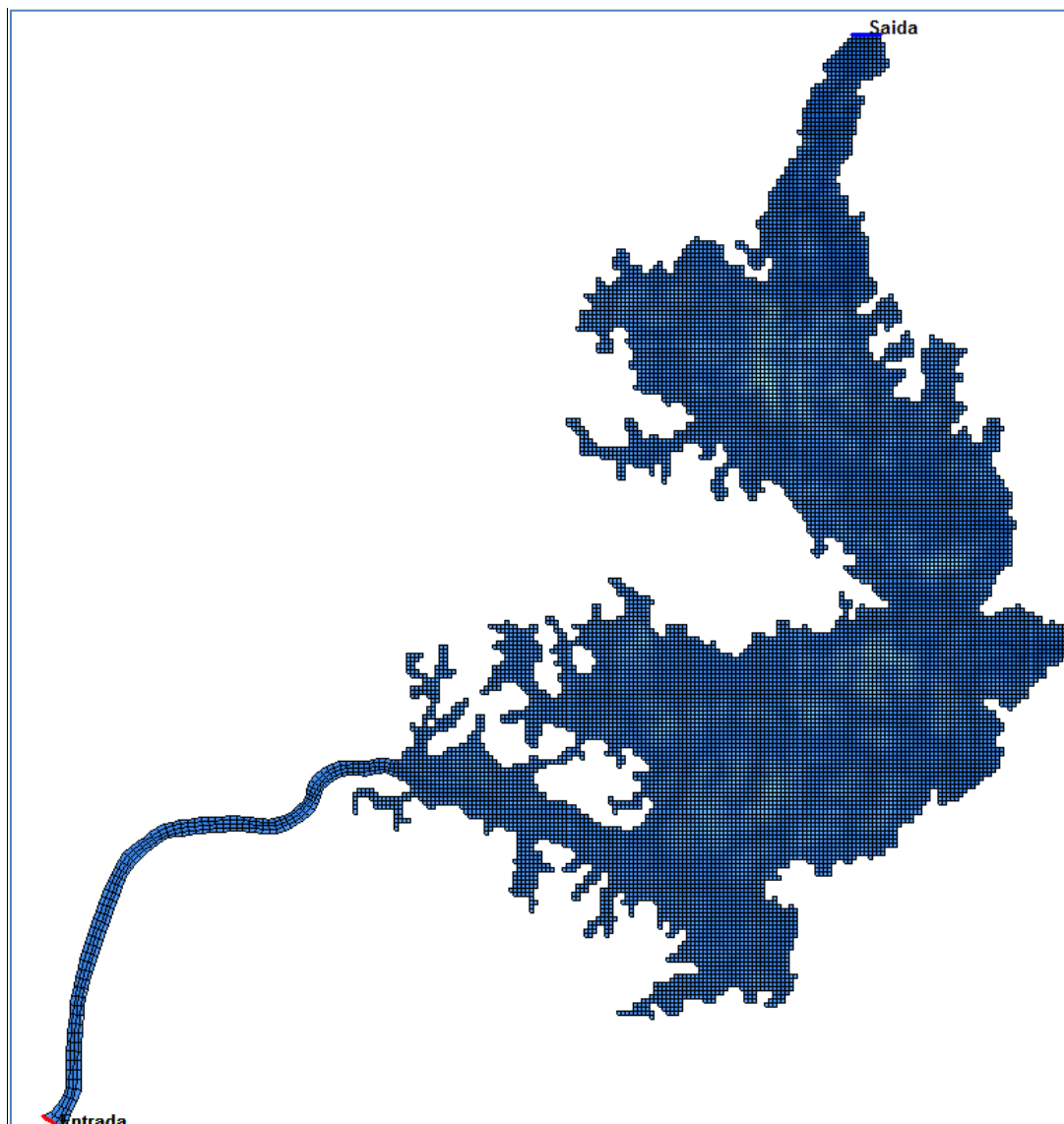
- Discretização do domínio: geração da grade numérica a ser utilizada no Delft3D<sup>®</sup> (Figura 104). A malha inicial possui uma resolução média horizontal de 100m x 100m, 10 camadas verticais (para o modelo 3D) e um total de 609.600 células;
- Definição da batimetria de todo o reservatório, realizada conforme descrição na seção 3.1.2;
- Definição das vazões de entrada e saída do reservatório –  $Q_{\text{turb}}$ ,  $Q_{\text{RI}}$ , e vazões dos igarapés conforme apresentado na Tabela 11;
- A condição inicial do nível do reservatório foi definida com referência no nível zero. Ou seja, a simulação inicia considerando que o reservatório se

---

encontra em uma situação onde o nível normal de operação (97,0 m) foi referenciado como nível 0,0 m.



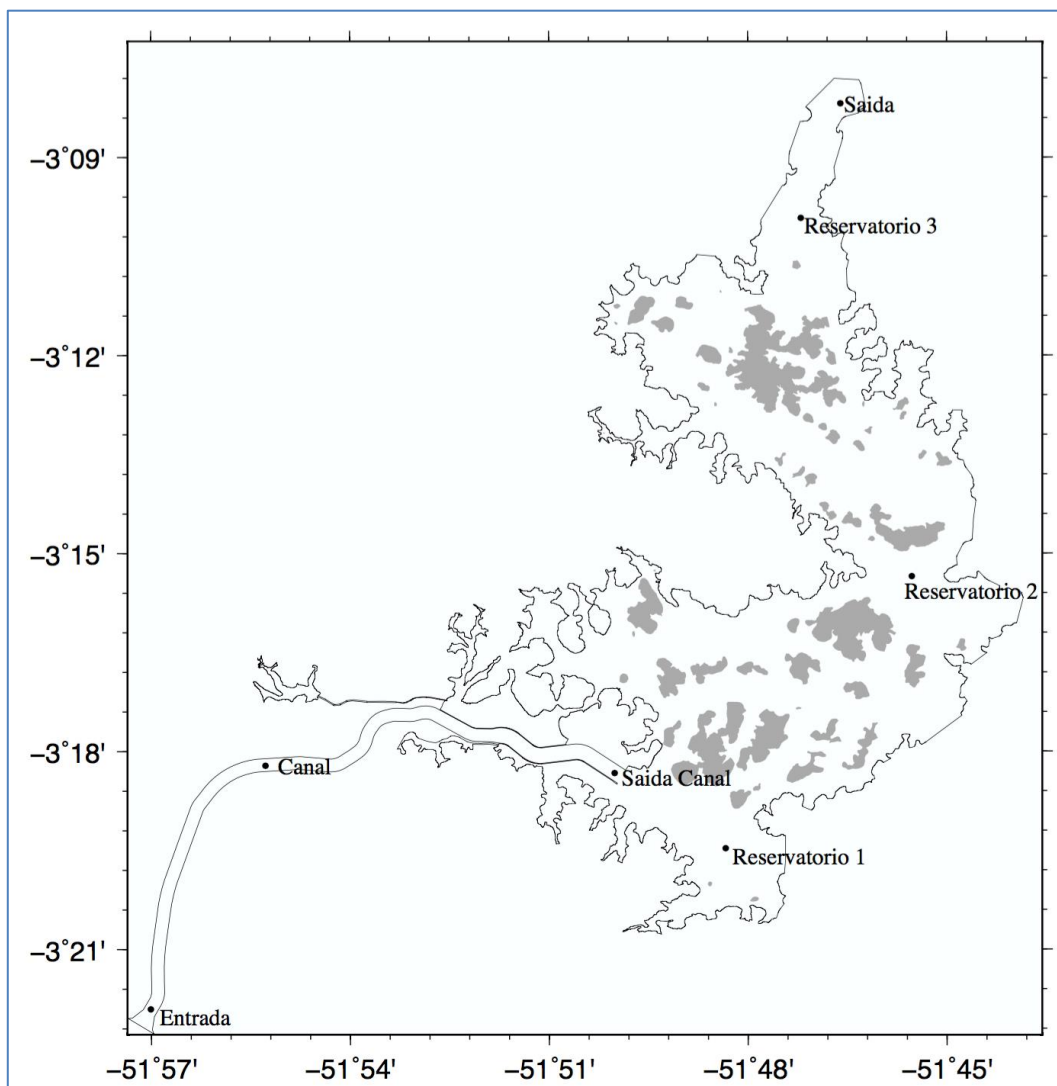
**Figura 103: Domínio de modelagem para o Reservatório Intermediário, com destaque para os pontos de entrada e saída e a localização dos Igarapés Interceptados pelos Diques.**



**Figura 104: Malha do Reservatório Intermediário.**

## **5.2. Resultados das simulações hidrodinâmicas**

Nessa seção são apresentados resultados da simulação hidrodinâmica do Reservatório Intermediário. A Figura 105 apresenta a área referente ao RI, onde se observam pontos de monitoramento (pontos em azul com respectivos nomes para os quais serão visualizados os resultados temporais). As séries temporais de nível do reservatório foram analisadas para entender a resposta do corpo d'água em função da operação em pulsos definidas pelas condições de contorno para cada um dos cenários simulados.



**Figura 105: Reservatório Intermediário com os pontos de monitoramento.**

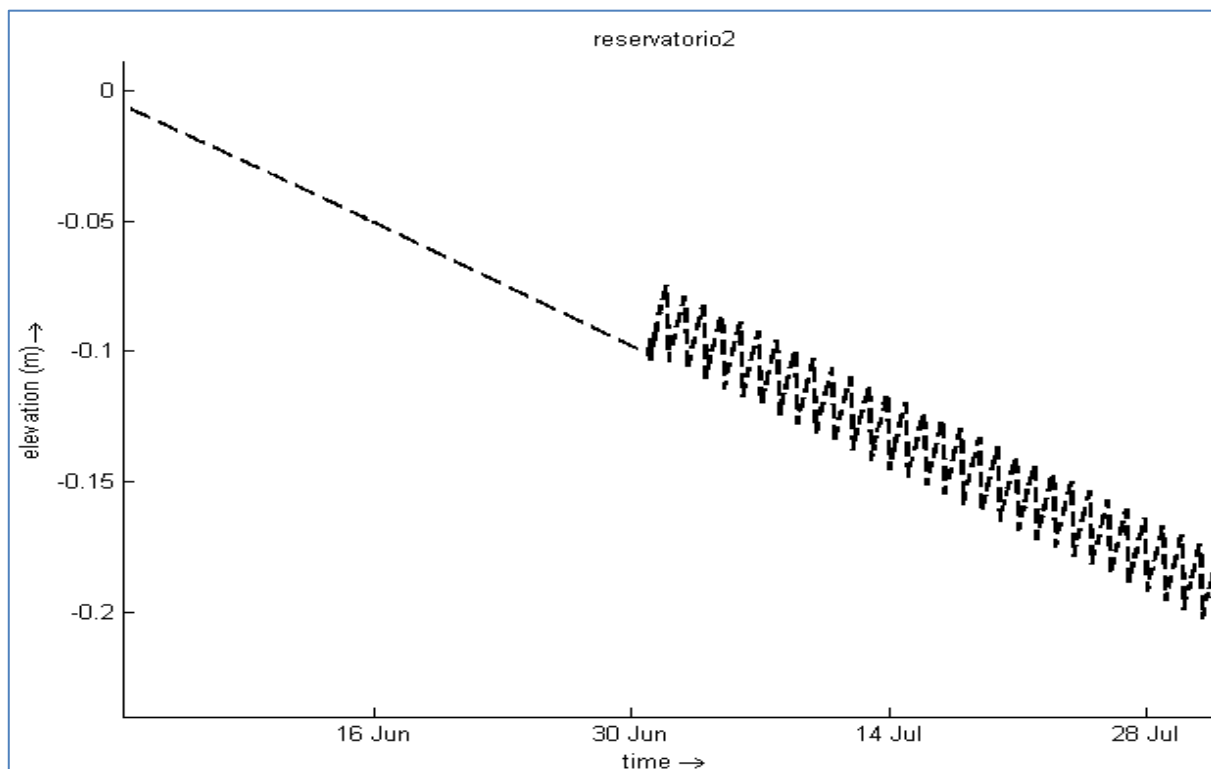
Para ilustrar a variação do nível ao longo do tempo, a Figura 106 apresenta parte da série temporal para o ponto de monitoramento denominado Saída Canal, obtido para o Cenário 1 considerando todo o período de simulação, ou seja, 12 meses. Observa-se que nos primeiros trinta dias de simulação, o nível do reservatório apresenta redução provocada pela perda de água por meio dos diques dos igarapés. Após esse primeiro mês a operação em pulsos tem início, provocando oscilações no nível do reservatório que se estendem por todo o período, definido na condição de contorno na saída do RI. Lembrando que para o Cenário 1 o turbinamento tem duração de duas horas com uma vazão média de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , é de se esperar que o nível apresente rebaixamento durante

---

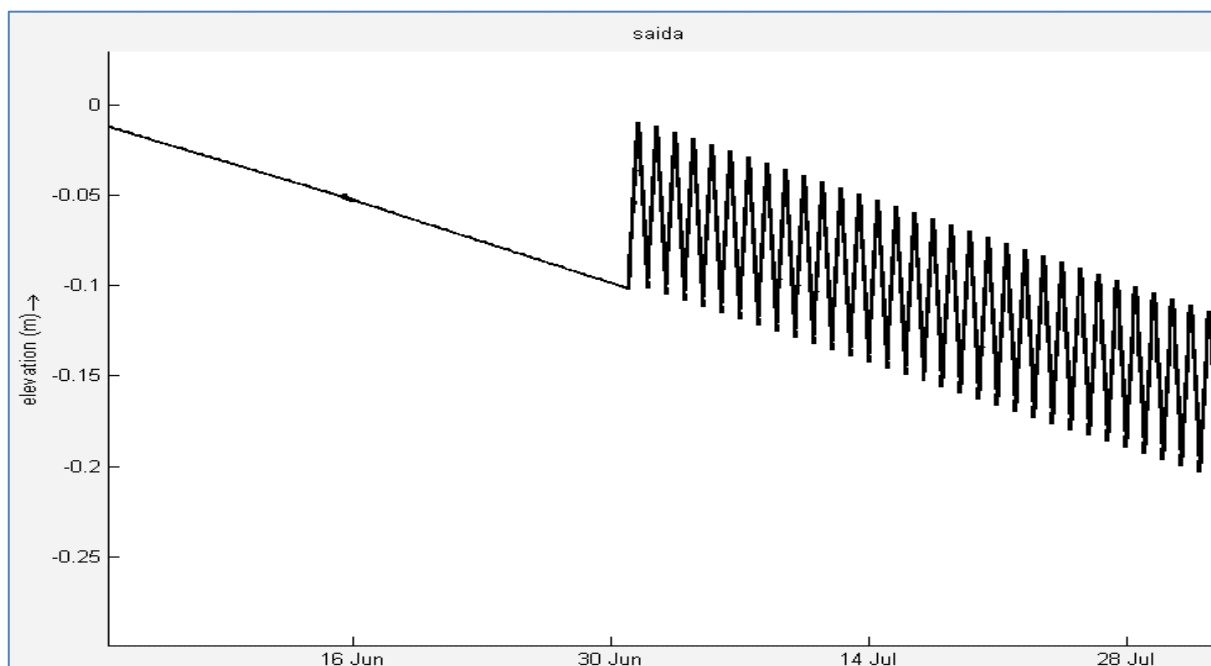
duas horas e depois se recupere ao longo das outras 22 horas do dia, quando não ocorre turbinamento.

Em comparação com o comportamento da variação do nível obtido para o Cenário 1, os resultados para o Cenário 6 são apresentados na Figura 107. Uma vez que a operação por pulsos para o Cenário 6 considera um período de 12 horas de turbinamento com vazão média de 300 m<sup>3</sup>/s, as variações observadas são maiores que as do primeiro cenário.

A comparação do rebaixamento do reservatório observado entre os dois cenários, apresentados na Figura 108 e na Figura 109, mostra que a profundidade do reservatório varia aproximadamente 3,0 cm durante as duas horas de turbinamento para o Cenário 1 e aproximadamente 11,5 cm para a operação definida para o Cenário 6. A Tabela 17 resume os resultados obtidos para os seis cenários simulados em função da duração do período da operação em pulsos e em função da vazão média operada. Esses resultados foram gerados com base na análise da variação do nível para os primeiros dias da operação.



**Figura 106: Variação do nível do reservatório em escala horária – Cenário 1.**



**Figura 107: Variação do nível do reservatório em escala horária – Cenário 6.**



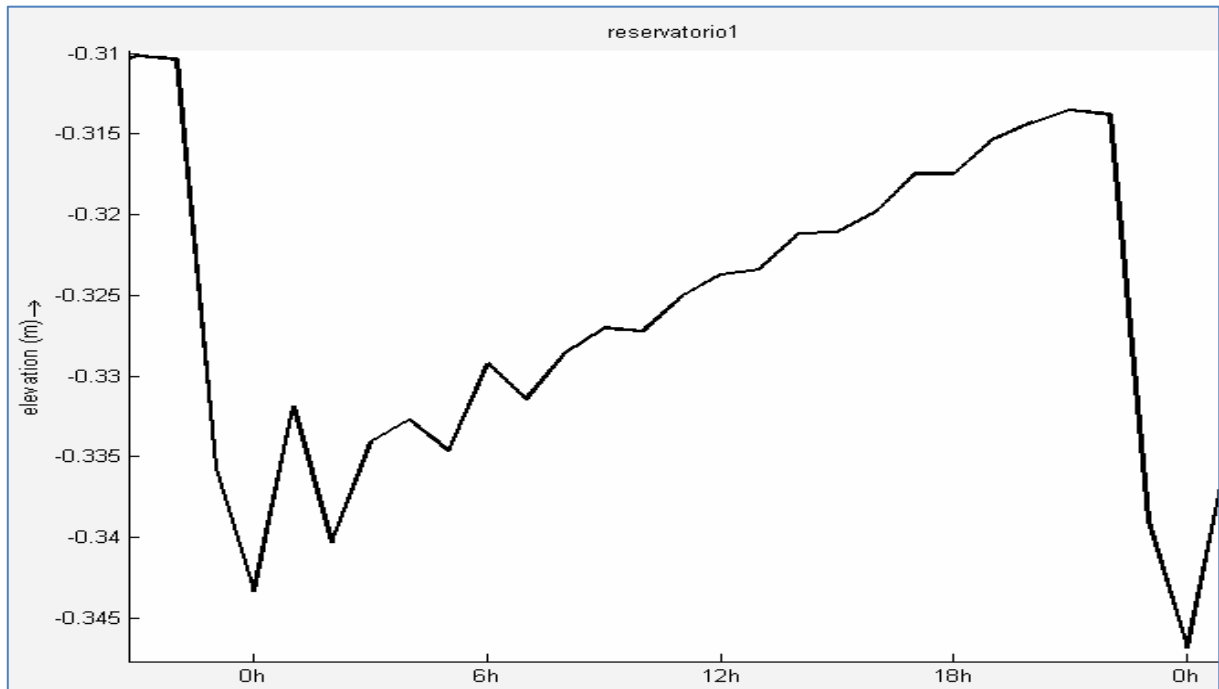


Figura 108: Variação do nível do reservatório em escala horaria – Período de 24 horas – Cenário 1.

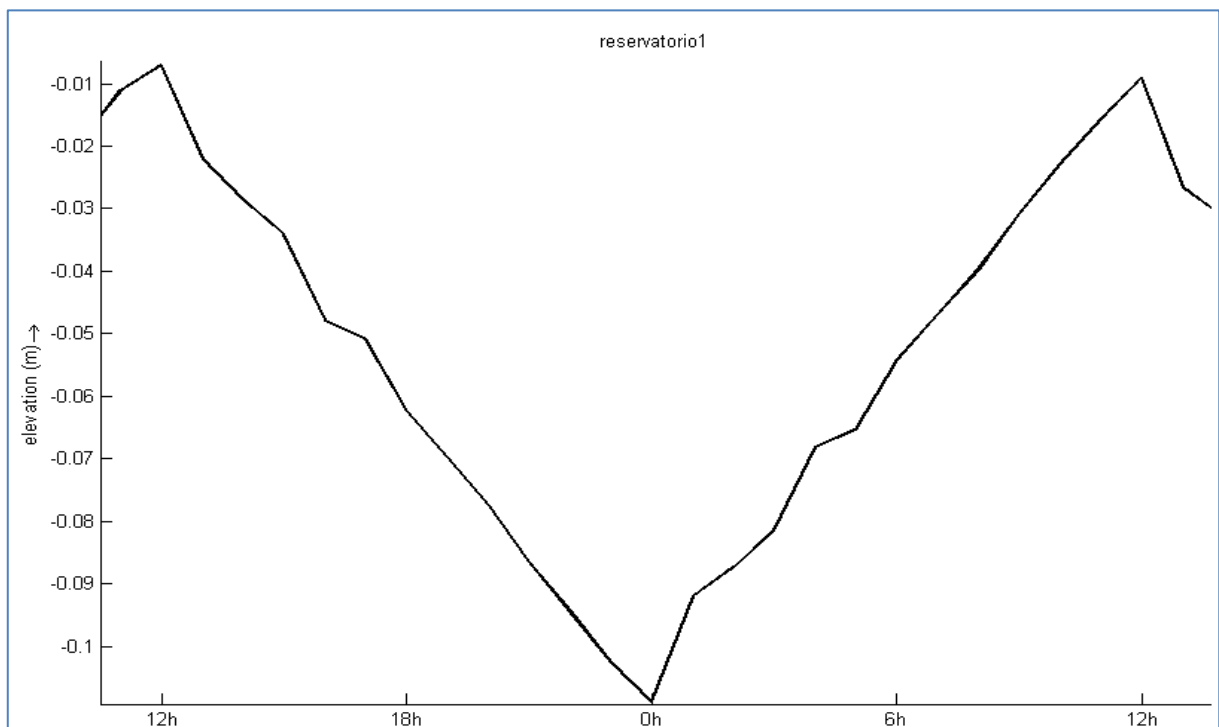


Figura 109: Variação do nível do reservatório em escala horaria – Período de 24 horas – Cenário 6.

Tabela 17: Variação do nível em função da operação por pulsos

Cenário	Horas de Operação	Q (m <sup>3</sup> /s)	Z (cm)
1	2	50	3,0
2	4	100	5,0
3	6	150	7,0
4	8	200	9,0
5	10	250	11,0
6	12	300	11,5

A análise da circulação hidrodinâmica forçada pelo campo de vento e pelas vazões afluentes e defluentes ao RI foi feita com base nos campos da velocidade integrado na vertical e com base na análise do campo de velocidade superficial e de fundo. A Figura 110 apresenta a magnitude do campo de velocidade integrada na vertical para toda a área do RI, obtida com as condições de contorno definidas para o Cenário 1. O instante apresentado corresponde ao dia 15 de setembro, ou seja, para o período de menor vazão da série e enquanto o turbinamento em pulsos está sendo realizado. Dentre todos os cenários simulados, o Cenário 1 é o que apresenta as menores vazões afluentes e defluentes, o que provoca velocidades mais baixas no reservatório (<0,1 m/s). Devido às baixas vazões definidas nos pontos de entrada e saída (contornos) do reservatório, a ação do vento na superfície acaba sendo o principal mecanismo que rege a sua circulação. A Figura 111 apresenta em detalhes a porção norte do reservatório onde ocorre o deflúvio devido à vazão turbinada. Nesta região o fluxo integrado na vertical possui direção bem definida, imposta pela condição de contorno, com velocidades inferiores a 0,5 m/s.

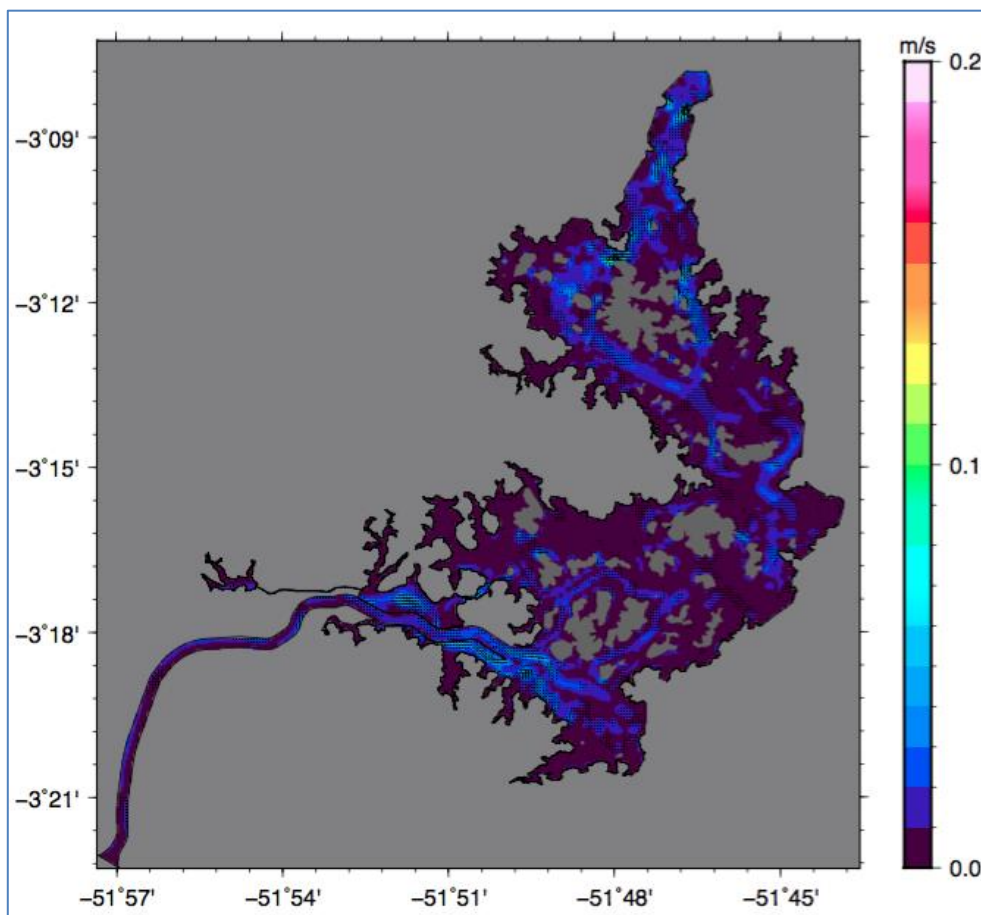


Figura 110: Campo de velocidade integrada na vertical para o Cenário 1 em 15 de setembro.

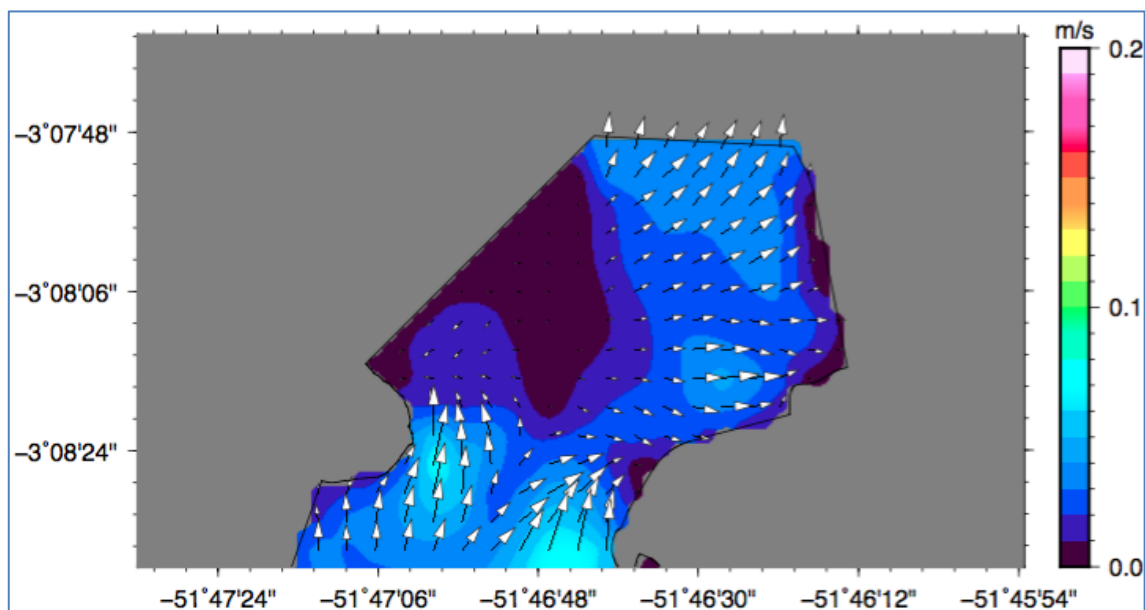
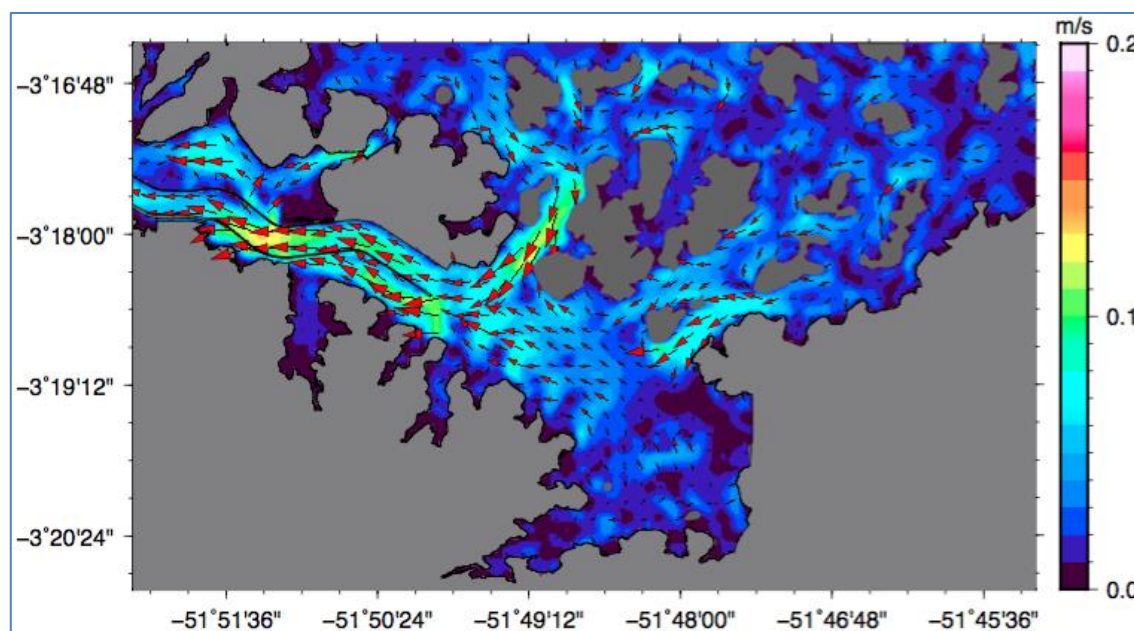


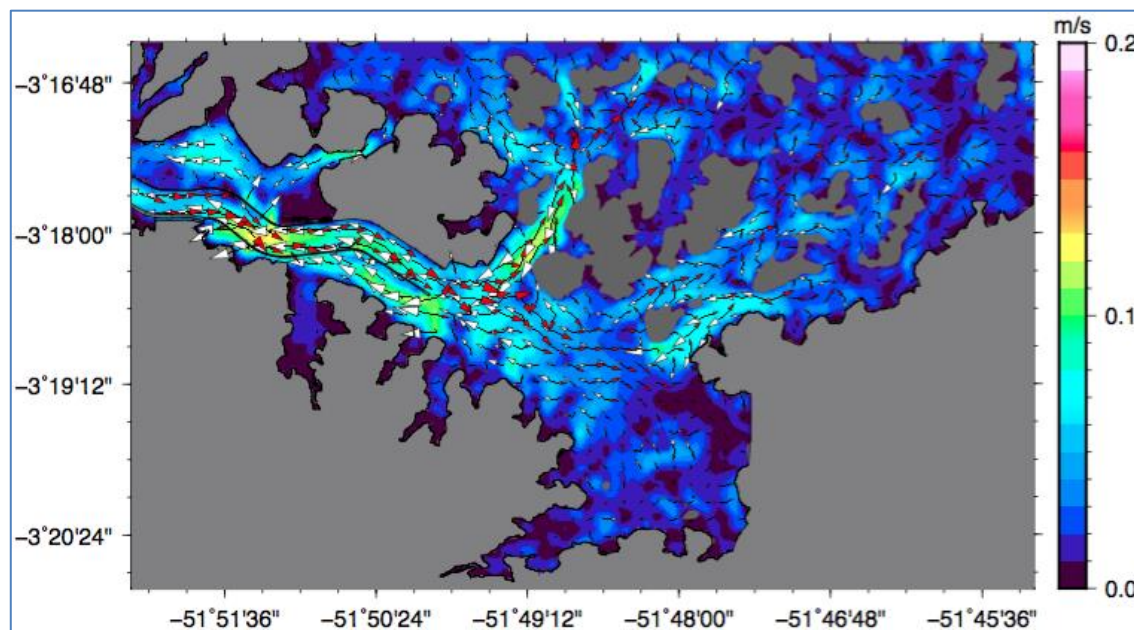
Figura 111: Detalhe Norte do campo de velocidade integrada na vertical para o Cenário 1 em 15 de setembro.

Para as áreas do reservatório afastadas dos contornos de entrada e saída a influência das condições de contorno (vazões de entrada e saída) é menos perceptível. Nessas áreas a circulação é completamente dominada pela forçante meteorológica. Isso pode ser observado na Figura 112, que apresenta o campo de velocidade integrado na vertical para a porção central do RI. Observa-se que o campo de velocidade não possui uma direção preferencial e também apresenta baixas velocidades, inferiores a 0,1 m/s.



**Figura 112: Campo de velocidade integrado na vertical para o Cenário 1 em 15 de setembro – Porção central do RI.**

A influência predominante do campo de vento na hidrodinâmica do RI pode ser melhor visualizada quando se observa o campo de velocidade superficial em conjunto com o campo de velocidade do fundo. Uma vez que as simulações foram realizadas considerando um modelo tridimensional com 10 níveis na vertical, se torna possível efetuar essa análise. A Figura 113 apresenta o campo de velocidade horizontal da primeira camada em conjunto com o campo horizontal da camada de fundo, ou seja, décima camada. Na superfície (vetores em branco) o fluxo é mais intenso e contrário ao fluxo de fundo (vetores em vermelho) o qual é regido pela vazão definida na entrada do reservatório.



**Figura 113: Campo de velocidade horizontal para o Cenário 1 em 15 de setembro – Superfície (Branco), Fundo (Vermelho).**

Na região do Canal de Derivação do RI, o contraste entre o campo de velocidade superficial e de fundo é ainda mais evidente (Figura 114). Nessa área o fluxo superficial, representado pelos vetores em branco, possui maior intensidade (0,2 m/s) e direção contrária ao fluxo imposto na entrada do canal, enquanto que o fluxo de fundo (vetores em vermelho) “protegido” da ação do vento se dirige para o interior do RI. Tanto a Figura 113 quanto a Figura 114 representam o campo de velocidade em situação de turbinamento para o dia 15 de setembro.

Para uma melhor identificação das regiões do reservatório que apresentam os maiores contrastes entre as velocidades superficiais e de fundo, a Figura 115 apresenta a diferença do módulo das velocidades entre essas duas camadas. Observa-se que as maiores diferenças se concentram no Canal de Derivação, com valores entre 0,05 e 0,15 m/s, sendo que na grande maioria da área do reservatório as diferenças são bem abaixo de 0,05 m/s.

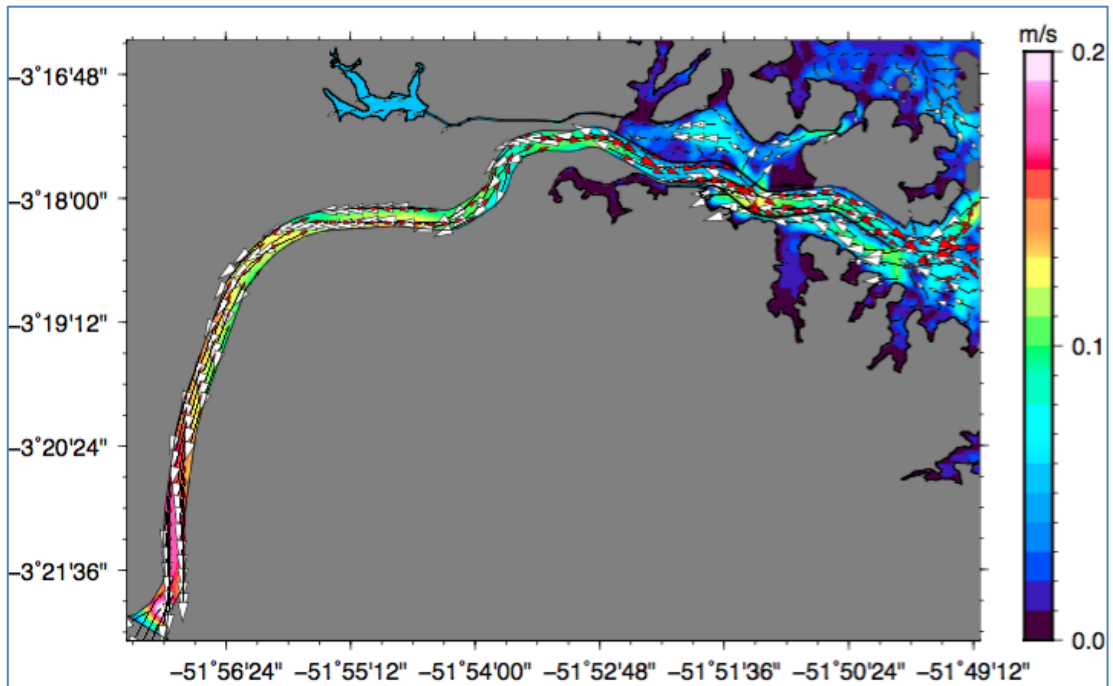


Figura 114: Campo de velocidade horizontal para o Cenário 1 em 15 de setembro – Superfície (Branco), Fundo (Vermelho).

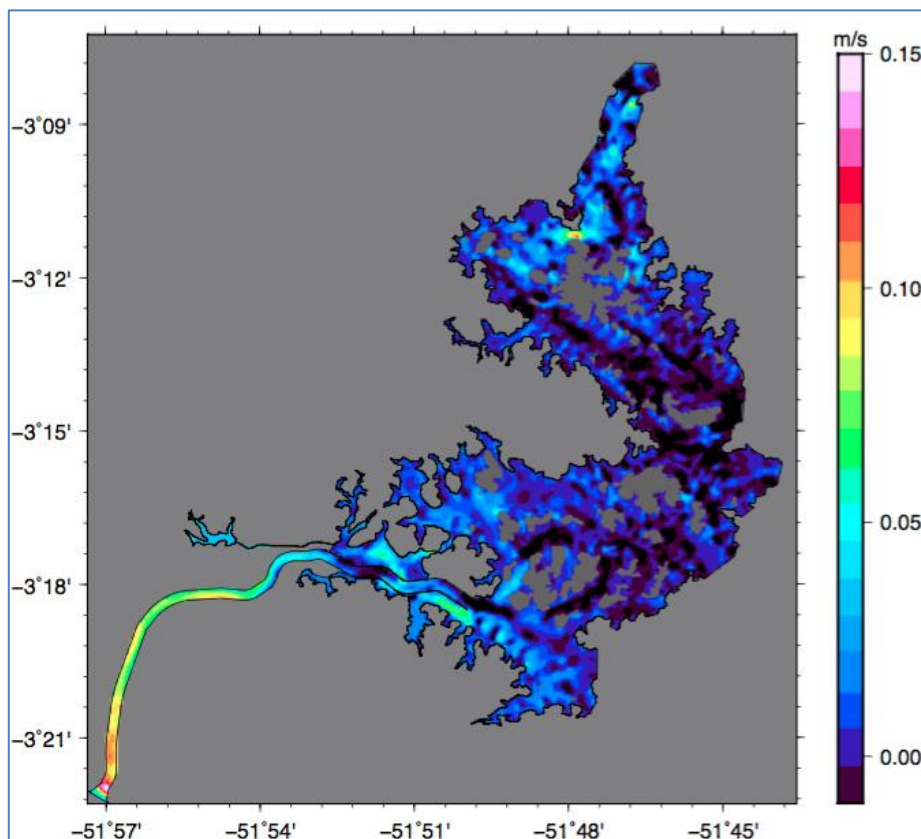
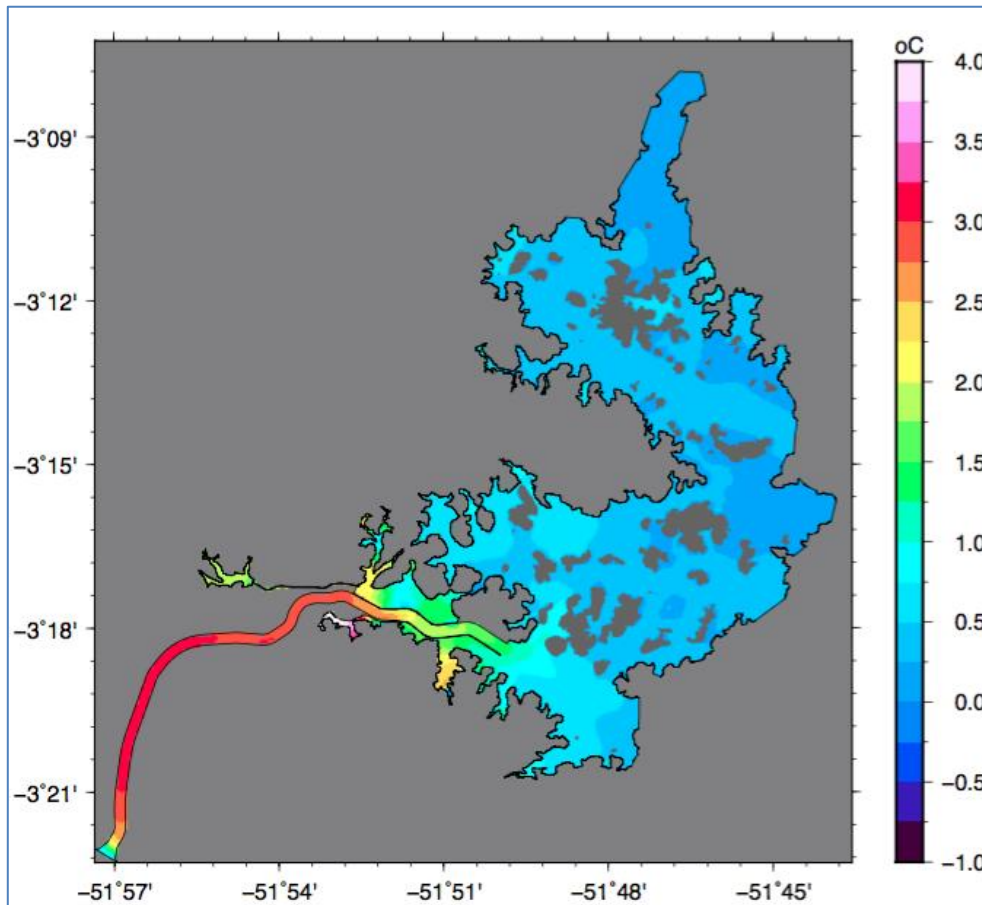


Figura 115: Diferença de velocidade entre a superfície e o fundo para o Cenário 1 em 15 de setembro.

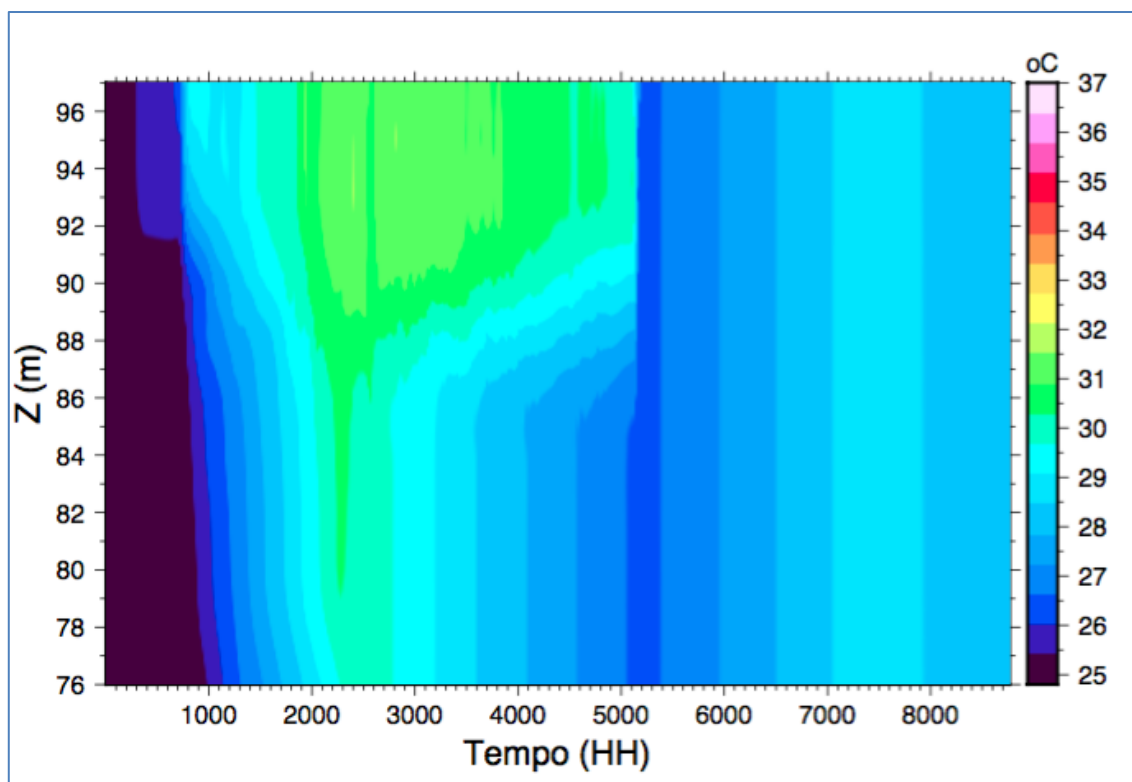
A Figura 116 apresenta a diferença do campo de temperatura entre a superfície e o fundo para o dia 15 de setembro. Da mesma forma que os resultados observados para o campo de velocidade, os maiores contrastes para o campo de temperatura, foram observados na área do Canal de Derivação, onde se encontram diferenças da ordem de 3°C, sendo que na maior parte do RI as diferenças se encontram abaixo de 0,5°C.



**Figura 116: Diferença de temperatura entre superfície e fundo, Cenário 1 – 15 de setembro.**

Essas diferenças dos campos de velocidade e temperatura entre a camada superficial e de fundo podem indicar a ocorrência de estratificação térmica do reservatório. É importante lembrar que essas diferenças apareceram na análise de um instante específico. Para um melhor entendimento da ocorrência de estratificação no interior do RI, é necessário observar o comportamento dessas diferenças para um período de tempo mais extenso. Nesse sentido, a Figura 117 mostra a evolução temporal para um período de um ano do campo de temperatura para todos os dez níveis em um

ponto localizado no interior do Canal de Derivação. As maiores diferenças entre a superfície e o fundo se encontram no período que ocorre a operação por pulsos. Logo no início da operação por pulsos a diferença de temperatura entre superfície e fundo atinge o maior valor, ao redor de 30°C nas camadas superficiais e 27°C no fundo (3°C de diferença). Esse mesmo resultado foi observado na análise do campo espacial das diferenças de temperatura (Figura 117), onde foi encontrada a diferença de 3°C na área do canal. No centro do período da operação por pulsos, no mês de setembro, as diferenças caem para valores da ordem de 1°C. Observa-se que entre os meses de outubro e dezembro (horas 4000 a 5000 do gráfico) o canal apresenta duas camadas distintas. Entre a superfície e aproximadamente 89 m de profundidade e uma segunda camada que se estende entre 88 m e o fundo.

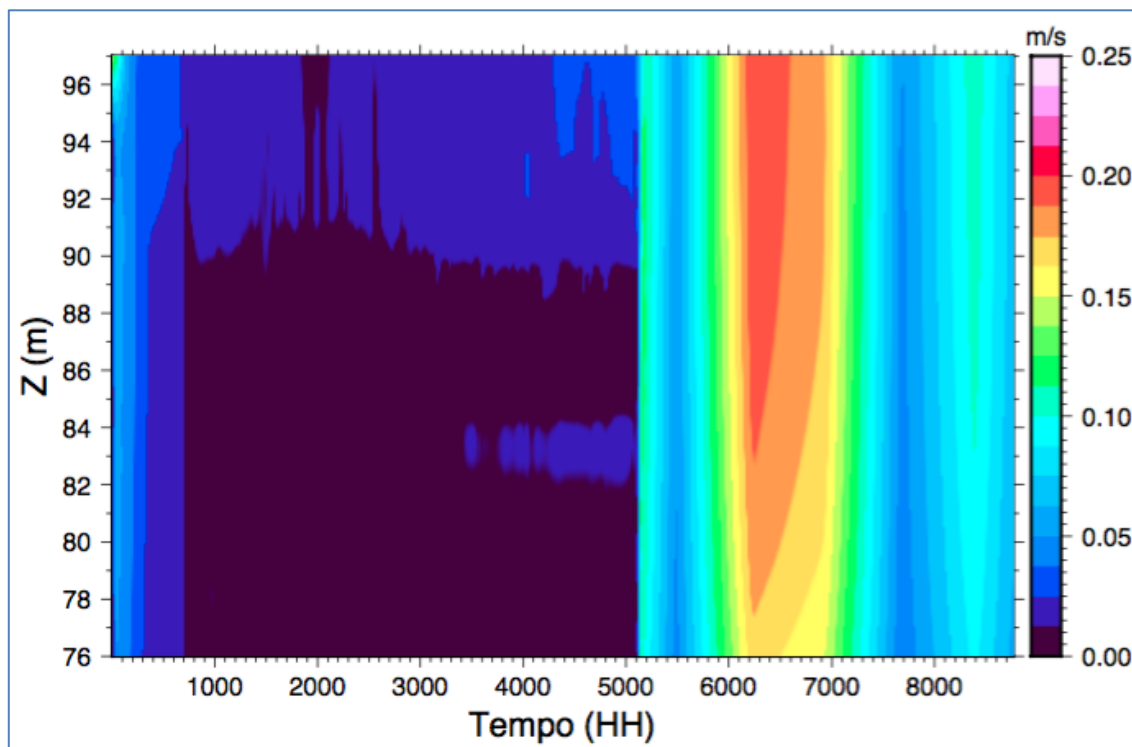


**Figura 117: Evolução temporal da temperatura interior do Canal de Derivação – Cenário 1.**

O mesmo tipo de análise, realizado com base no campo de velocidade, mostra que a diferença observada entre superfície e fundo (Figura 110), apresenta-se como um fenômeno que perdura por todo o período em que ocorre a geração em pulsos, ou seja,

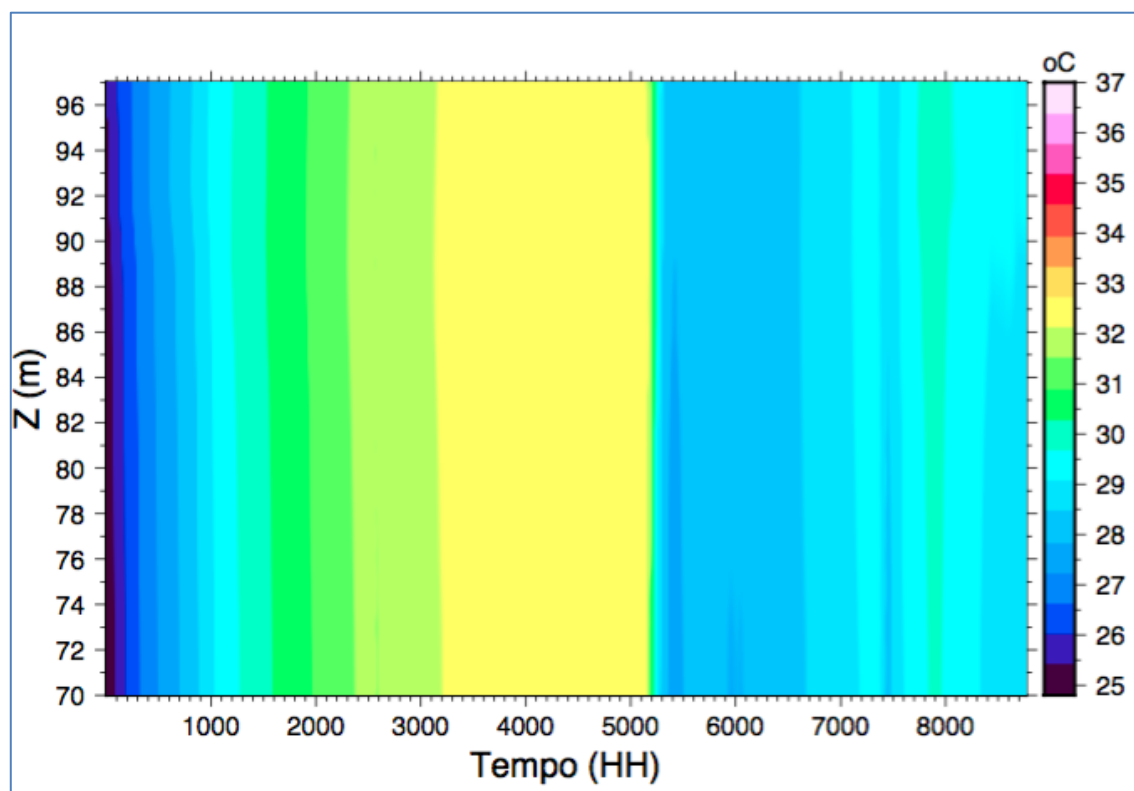


entre julho (hora 1000) e dezembro (hora 5000). Como pode ser observado na Figura 118, as diferenças de velocidades são da ordem de 0,1 m/s entre as camadas superficiais e as camadas inferiores.



**Figura 118: Evolução temporal campo de velocidade interior do Canal de Derivação – Cenário 1.**

A análise da evolução temporal, feita para o ponto localizado no Canal de Derivação, também foi realizada para o ponto denominado Reservatório 2 (Figura 105). Essa análise foi conduzida no sentido de se comparar duas regiões com características hidrodinâmicas distintas, lembrando que essa verificação foi realizada com o objetivo de identificar a ocorrência de estratificação no período de estiagem devido à operação por pulsos. O resultado para o Cenário 1, no ponto de monitoramento Reservatório 2, é apresentado na Figura 119, onde se observam temperaturas uniformes entre todas as camadas verticais, sem nenhuma evidência de estratificação térmica.



**Figura 119: Evolução temporal da temperatura Reservatório 2 – Cenário 1.**

A evolução temporal para o campo de velocidade, monitorada no ponto Reservatório 2, é apresentada na Figura 120. Focando a análise desse resultado no período onde ocorre o turbinamento, ou seja, entre o instante 0 e 5000 horas, observa-se velocidades uniformes entre a superfície e as demais camadas inferiores da coluna de água. Para o período em que se encerra a operação em pulsos, após as 5000 horas, é possível notar variações de velocidade entre as camadas verticais, com máximas da ordem de 0,12 m/s na superfície e 0,05 m/s no fundo.

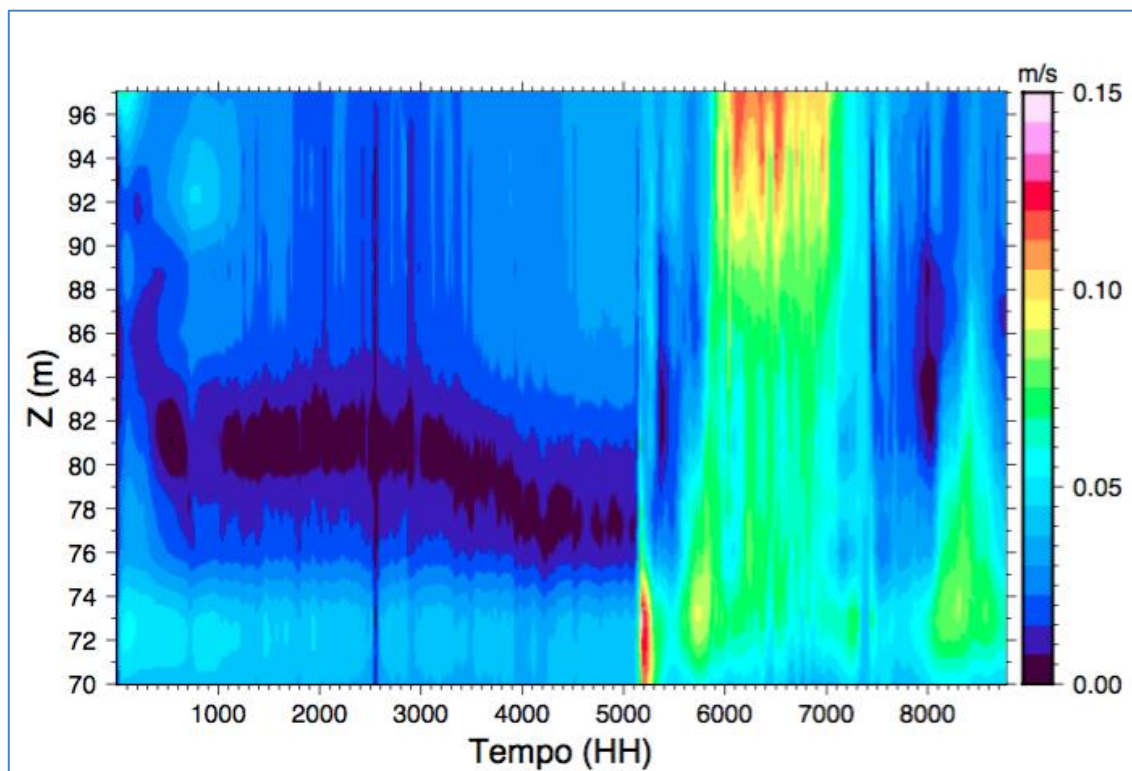
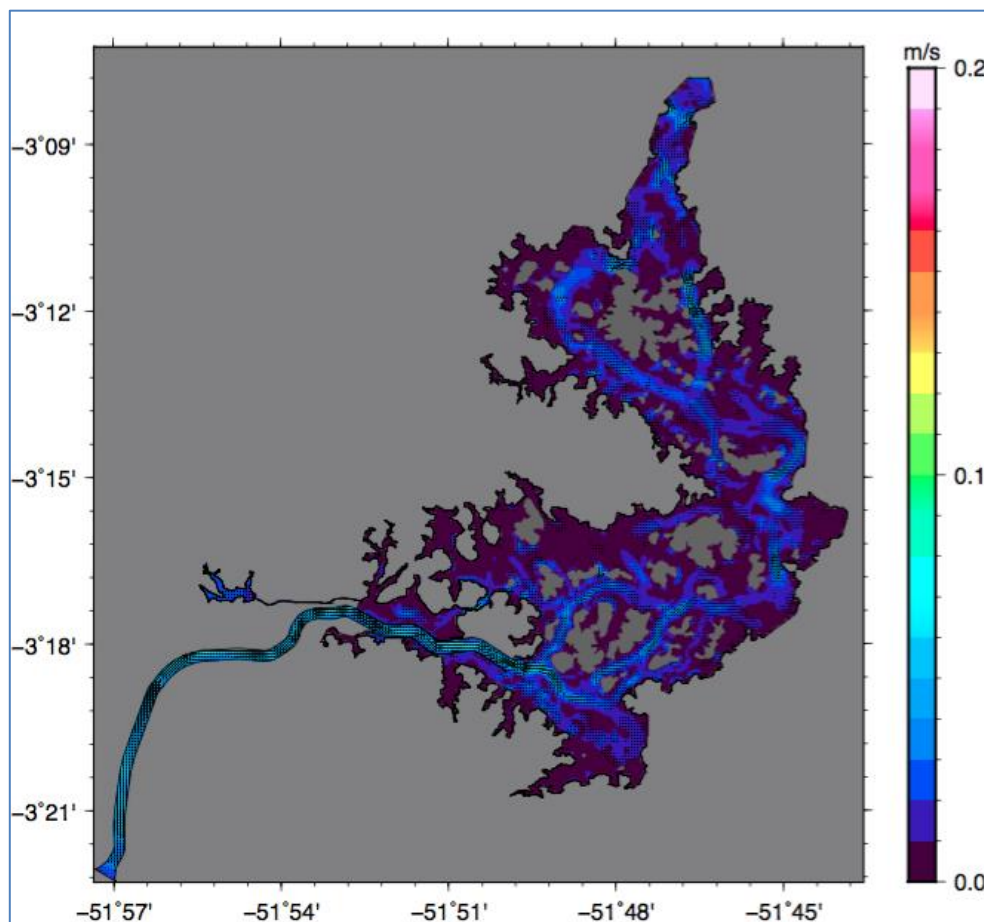


Figura 120: Evolução temporal da velocidade no ponto Reservatório 2 – Cenário 1.

Em termos das vazões afluentes e defluentes no RI, o Cenário 6 possui maior contraste em relação ao Cenário 1. A Figura 121 apresenta o campo de velocidade integrado na vertical (Cenário 6) para o dia 15 de setembro. Nesse cenário, a condição de contorno na saída impõe uma vazão média de 300 m<sup>3</sup>/s durante um período de 12 horas por dia. Em comparação com a Figura 110, observa-se velocidades mais intensas, principalmente ao longo do Canal de Derivação.



**Figura 121: Campo de velocidade integrado na vertical - Cenário 6, 15 de setembro.**

A análise do campo de velocidade integrada na vertical para a região localizada próxima à casa de força, área norte do RI, Figura 122, mostra um fluxo mais bem definido em direção ao canal de fuga. Como comentado anteriormente, isso se deve ao fato dos fluxos de entrada e saída do RI, definidos para o Cenário 6, serem muito mais intensos que os fluxos definidos no Cenário 1. Esse fato fica bem evidente ao analisarmos o comportamento do campo de velocidade integrada na vertical para a região do canal e parte da região central. Nessas áreas, representadas pela Figura 123, observa-se que, em contraste com o campo de velocidade representado pela Figura 112, esse campo se apresenta mais definido, e é regido pela imposição do fluxo de entrada no canal. Ou seja, a intensidade do fluxo afluyente sobrepõe à ação do vento, gerando um campo de corrente bem definido em direção ao interior do reservatório.

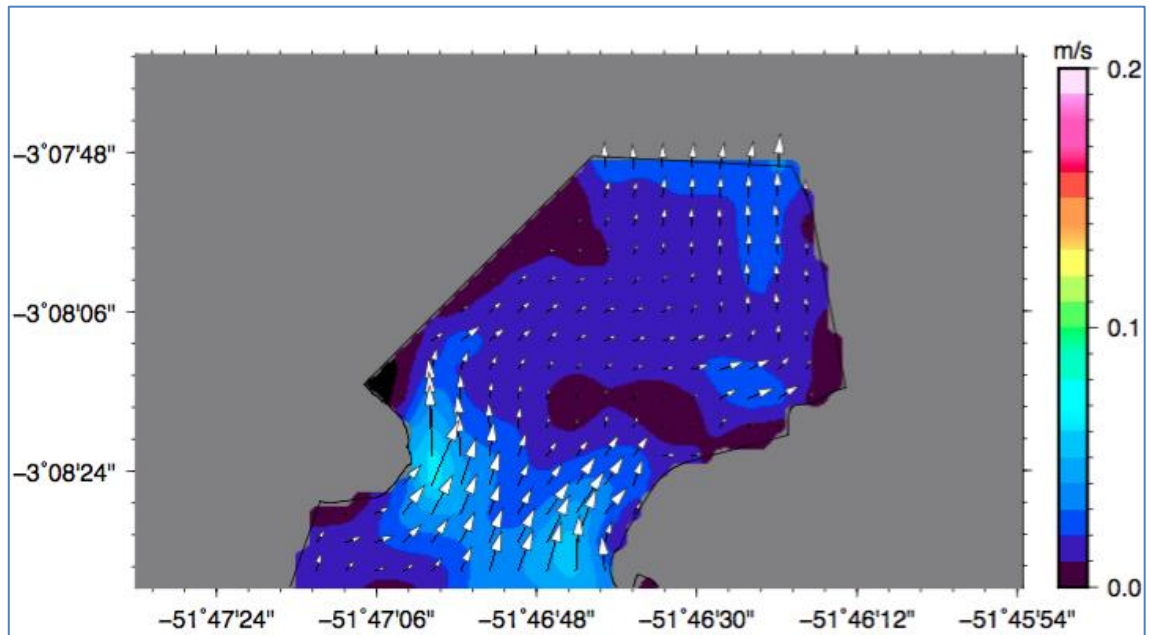


Figura 122: Detalhe Norte do campo de velocidade integrado na vertical - Cenário 6, 15 de setembro.

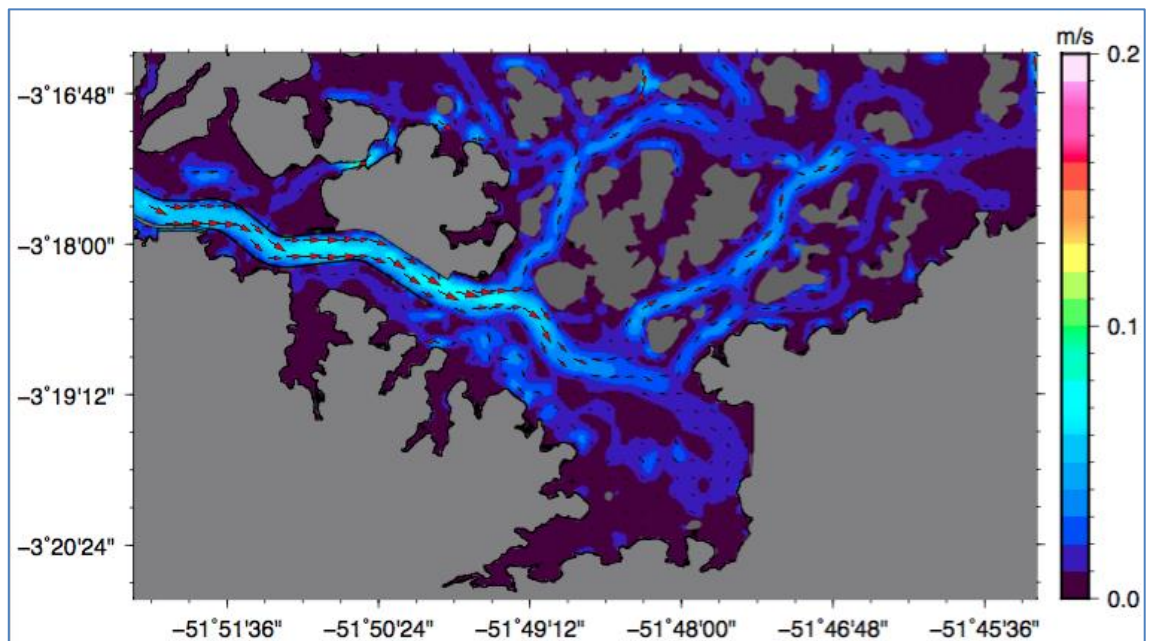
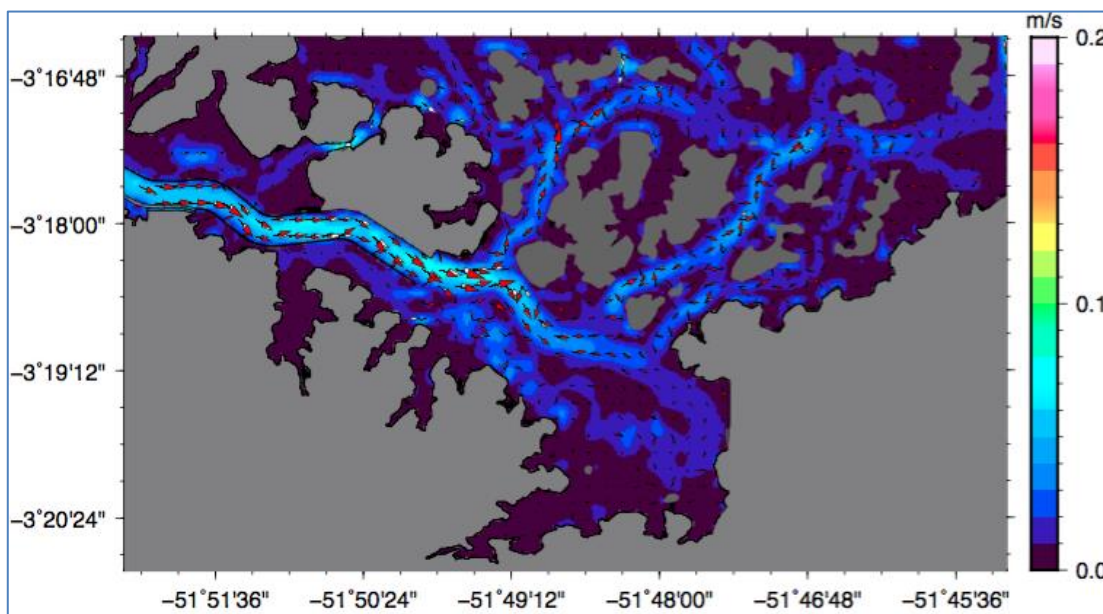


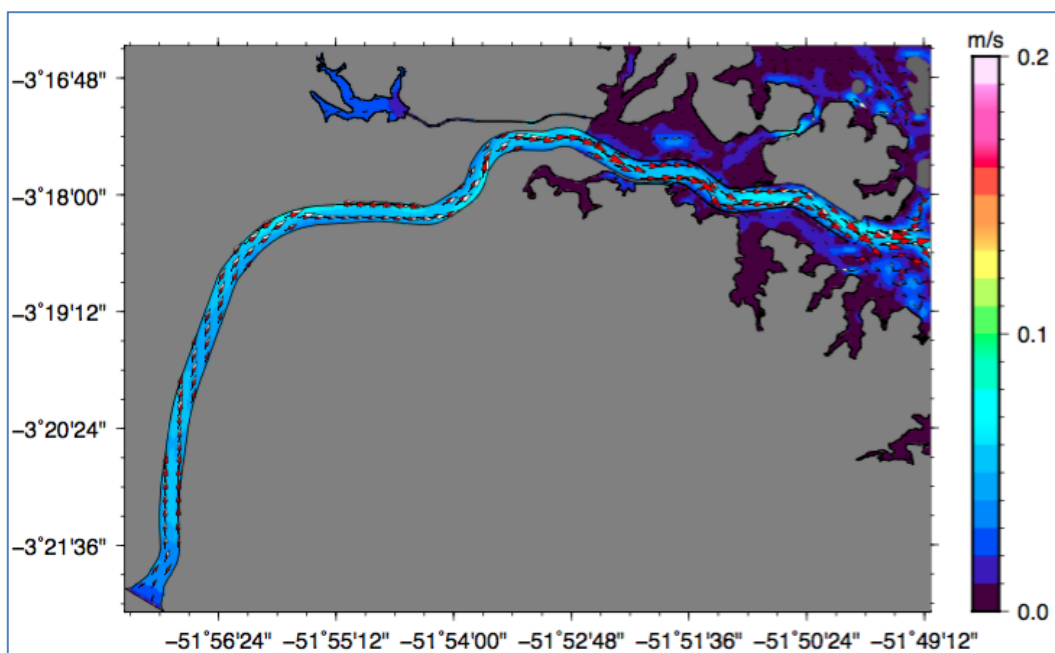
Figura 123: Campo de velocidade integrado na vertical – Detalhe próximo do fim do Canal de Derivação entrando no RI - Cenário 6, 15 de setembro.

A comparação do campo de velocidade entre a superfície e o fundo para o Cenário 6, representado pela Figura 124, mostra fluxos perfeitamente alinhados. Em comparação com o campo de velocidades, apresentado na Figura 113, observa-se como regime de operação do Cenário 6 sobrepõe a ação do vento, uniformizando o fluxo em todas as

camadas do RI. O mesmo comportamento de alinhamento do fluxo entre a superfície e fundo é observado na região do canal (Figura 125). Observa-se ainda, que mesmo com a imposição de fluxos mais intensos representados pelo Cenário C6, as máximas velocidades simuladas não ultrapassam 0,1 m/s.



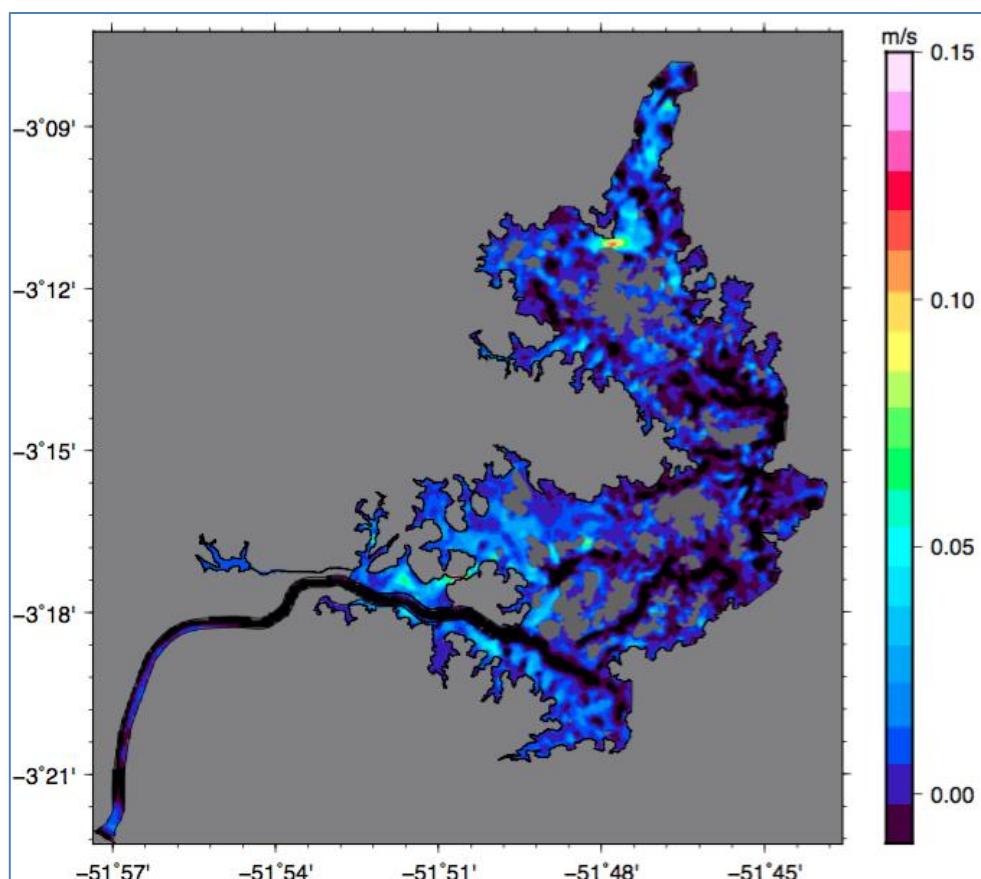
**Figura 124: Campo de velocidade horizontal. Cenário 6, 15 de setembro – Superfície (Branco) e fundo (Vermelho).**



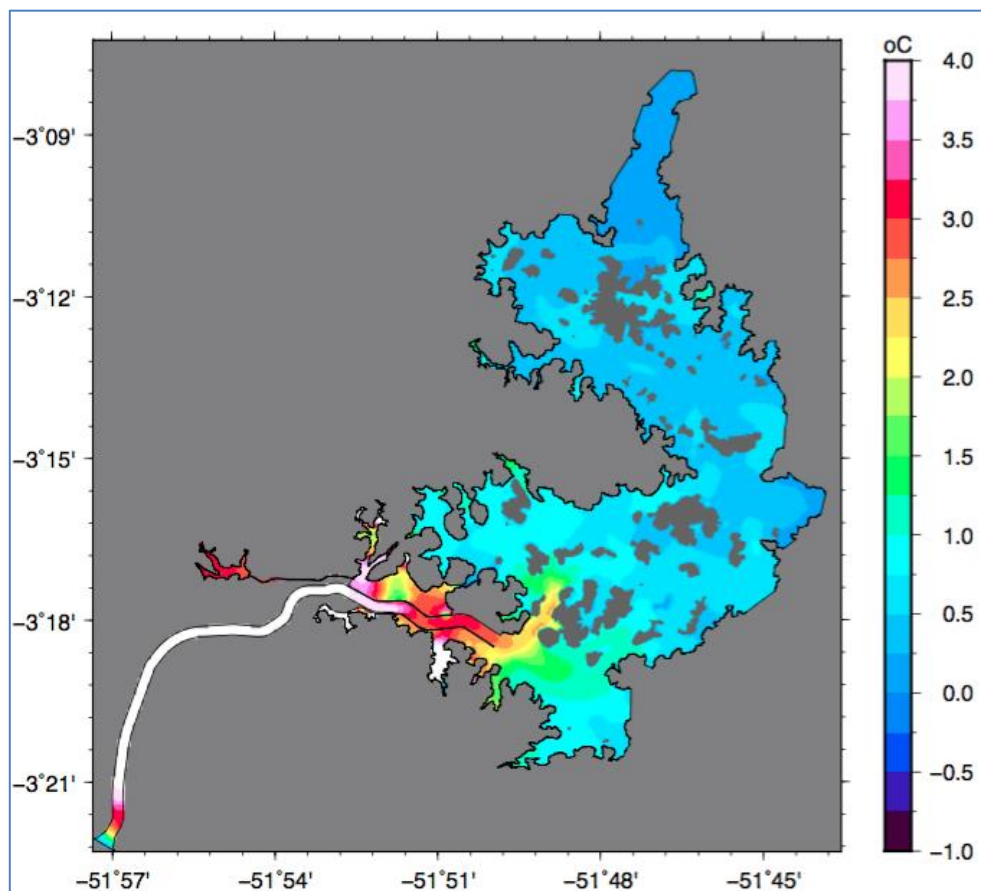
**Figura 125: Campo de velocidade horizontal. Cenário 6, 15 de setembro – Superfície (Branco) e fundo (Vermelho).**

A Figura 126 apresenta as diferenças, entre a superfície e o fundo, do campo de velocidade para o dia 15 de setembro para o Cenário 6. Como era de se esperar, baseado nas análises anteriores, na região do Canal de Derivação não existe diferença entre as velocidades, o que mostra que o fluxo é verticalmente uniforme. Em alguns pontos isolados do RI é possível identificar áreas que apresentam contrastes entre essas duas camadas, com diferenças inferiores a 0,1 m/s.

A diferença entre as temperaturas superficiais e de fundo, para o Cenário 6, (Figura 127) apresentam características análogas às observadas para os resultados do Cenário 1. Na região do Canal de Derivação as diferenças entre os valores ficam entre 3°C e 4°C, enquanto que na maior parte do reservatório essas diferenças não ultrapassam 1°C.



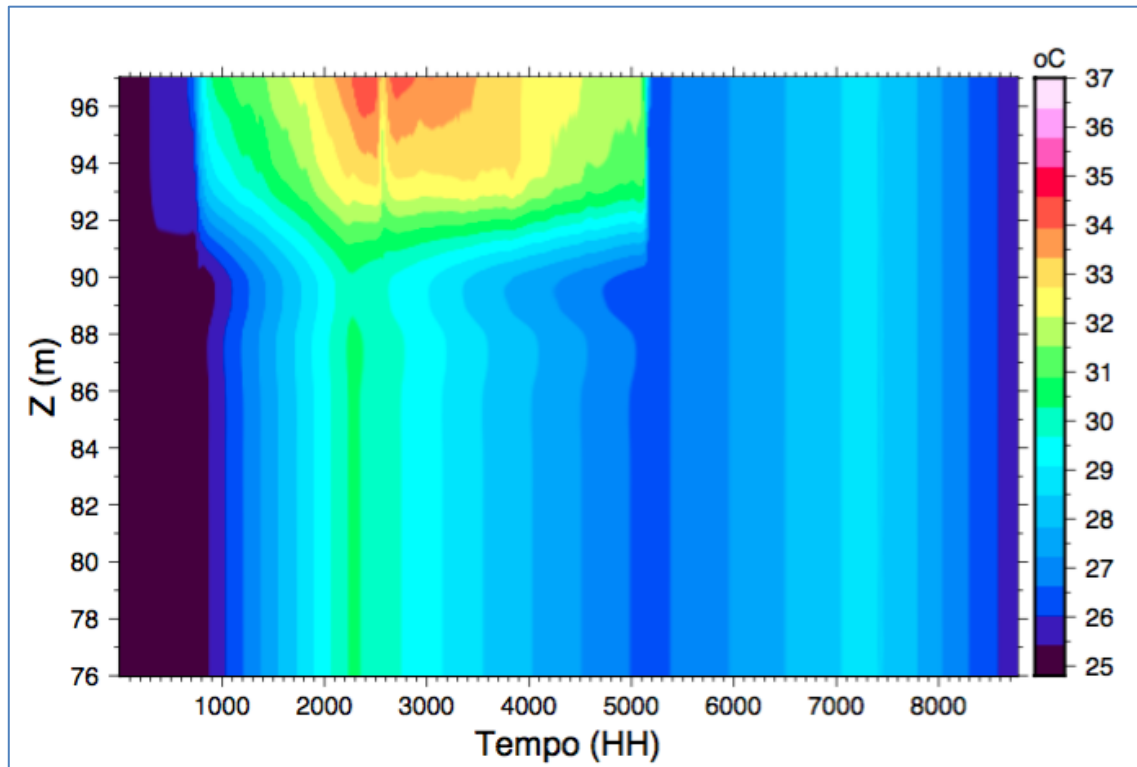
**Figura 126: Diferença de velocidade entre a superfície e o fundo Cenário 1 - 15 de setembro.**



**Figura 127: Diferença de temperatura entre superfície e fundo Cenário 6 – 15 de setembro.**

Da mesma forma como realizado para o Cenário 1 é importante analisar o comportamento do campo de temperatura ao longo do tempo para pontos específicos do RI. A Figura 128 ilustra a variação temporal da temperatura ao longo da coluna de água para um ponto localizado no canal de acesso. Com base na análise dos resultados observa-se gradientes verticais com diferenças atingindo valores da ordem de 4°C ocupando o centro do período da operação por pulsos. Nota-se ainda duas camadas distintas, a primeira ocupando os primeiros 6 metros da coluna de água e uma segunda ocupando a camada inferior de 14 metros de coluna de água.





**Figura 128: Evolução temporal da temperatura interior do Canal de Derivação – Cenário 6.**

A Figura 129 apresenta a evolução temporal do campo de temperatura para o ponto de monitoramento Reservatório 2 localizado no interior do RI. Nesse ponto, onde o comportamento hidrodinâmico não é afetado diretamente pela vazão oriunda do Canal de Derivação, o campo de temperatura apresenta valores uniformes entre as camadas superficiais e as de fundo, mais uma vez evidenciando a ausência de estratificações térmicas.

De forma análoga aos resultados obtidos anteriormente para o Cenário 1, a evolução temporal do campo de velocidade, apresentada na Figura 130, não apresenta diferenças significativas entre a superfície e as camadas de fundo. As maiores diferenças ocorrem após o fim do período de operação por pulsos.

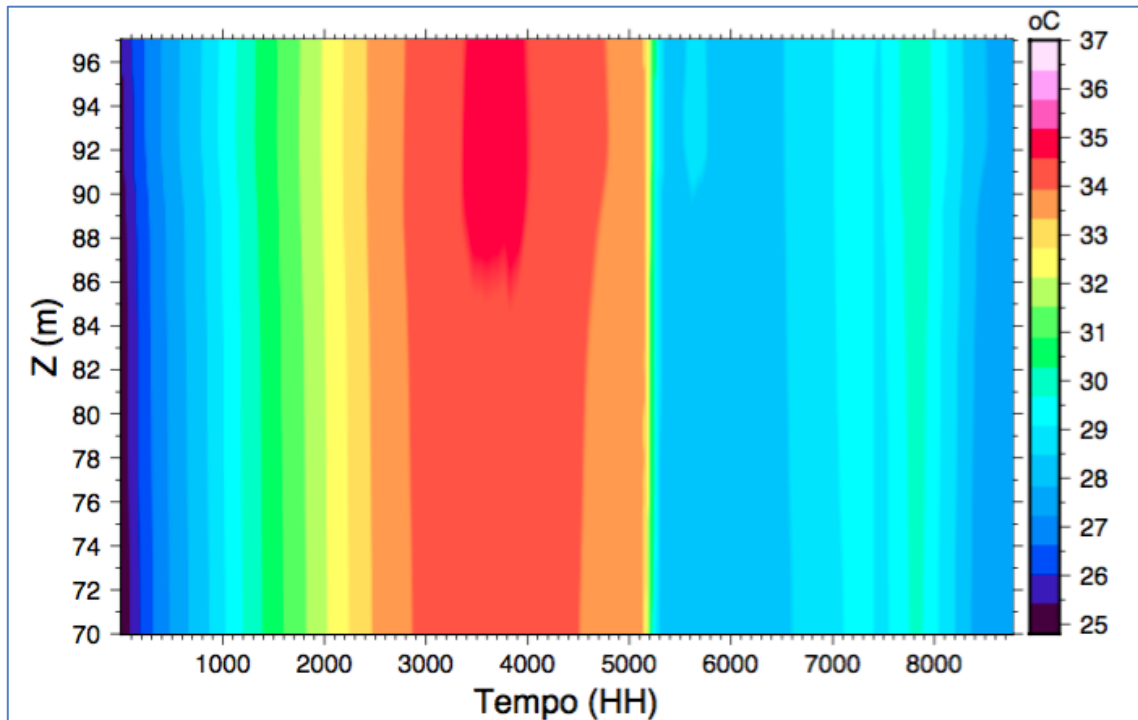


Figura 129: Evolução temporal da temperatura no ponto Reservatório 2 – Cenário 6.

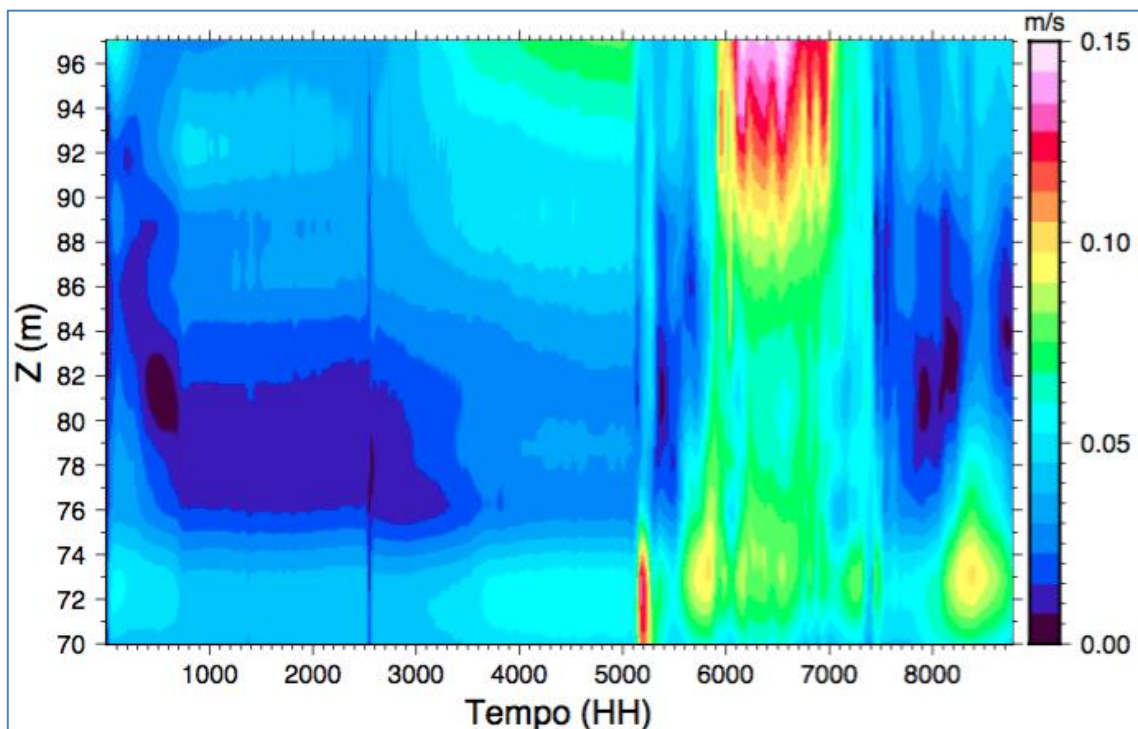


Figura 130: Evolução temporal da velocidade no ponto Reservatório 2 – Cenário 6.

### 5.3. Implementação das simulações de qualidade da água

O modelo de qualidade da água foi implementado com base nos campos hidrodinâmicos obtidos com as simulações dos cenários anteriormente descritos – todos os cenários foram simulados por um período de um ano, com início em 01 de junho. As concentrações das variáveis de qualidade da água, utilizadas como condição de contorno na entrada do RI, foram obtidas a partir dos resultados da modelagem da qualidade da água do reservatório de Xingu (RX), os quais já foram apresentados na seção 4.3. As condições iniciais foram definidas a partir do monitoramento trimestral realizado em pontos no interior do RI, incluindo o ponto localizado no canal de entrada ao reservatório e os pontos localizados nos igarapés. As variáveis de qualidade de água usadas como forçante no modelo foram o Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Clorofila (Chl), Nitrato (NO<sub>3</sub>), Amônia (NH<sub>4</sub>), Nitrogênio (N) e Fósforo (P). Como comentado, a série temporal dessas variáveis, utilizadas na definição da condição de contorno na entrada do RI foi gerada com base nas saídas das simulações do modelo SisBaHiA® – estas séries correspondem àquelas apresentadas na seção 4.4 para o ponto Saída RI.

A Tabela 18 apresenta os principais parâmetros do modelo DELFT3D-WAQ e os valores utilizados nas simulações dos 7 cenários.

Tabela 18: Principais parâmetros, sua descrição e valor utilizado na modelagem.

Código	Descrição	Unidade	Valor
NCRatGreen	Razão Nitrogênio/Carbono para Algas Verdes	(gN/gC)	0,16
PCRatGreen	Razão Fósforo/Carbono Para Algas Verdes	(gP/gC)	0,02
Grtochi	Razão Clorofila-a/Carbono para Algas Verdes	(mgChlfa/gC)	50,0
RcDenSed	Taxa de desnitrificação no sedimento (1ª ordem)	(m/d)	1,04
CTDEN	Temperatura Crítica para desnitrificação	(°C)	1,10

## 5.4. Resultados das simulações de qualidade da água

O principal objetivo das análises realizadas é a identificação da ocorrência de problemas de qualidade da água e de estratificação no RI. Nesse sentido, foram realizadas comparações de concentração de propriedades da água, das camadas superficiais com as camadas de fundo, para os parâmetros de qualidade mais sensíveis à ocorrência desse fenômeno.

### 5.4.1. Resultados para OD

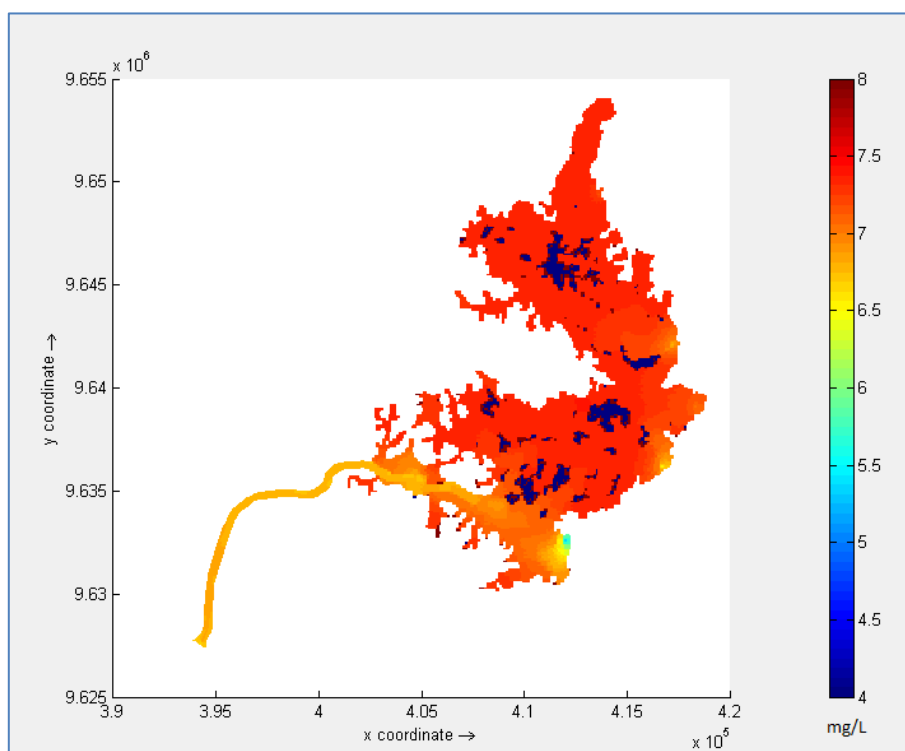
A distribuição espacial da concentração de OD para a camada superficial do RI é apresentada na Figura 131. Essa distribuição espacial representa a concentração de OD no dia 15 de setembro, período de menor vazão de afluente ao RX. A partir desse resultado observa-se que a região do canal é dominada por águas com concentrações de OD da ordem de 6,5 mg/L; estas ocorrem devido aos valores utilizados no contorno de entrada no RI. Na direção do interior do reservatório as concentrações atingem valores mais elevados, entre 7 e 7,5 mg/L.

A Figura 132 apresenta a distribuição espacial obtida com base nas forçantes definidas para o Cenário 2. A diferença mais marcante se deve ao fato de que vazões afluentes mais intensas, definidas na entrada do canal, provocam uma maior intrusão das águas com concentrações mais baixas de OD. A parte superior do reservatório, onde os fluxos são influenciados mais fortemente pelos campos de vento, as concentrações de OD se comportam de forma análoga ao observado no Cenário 1.

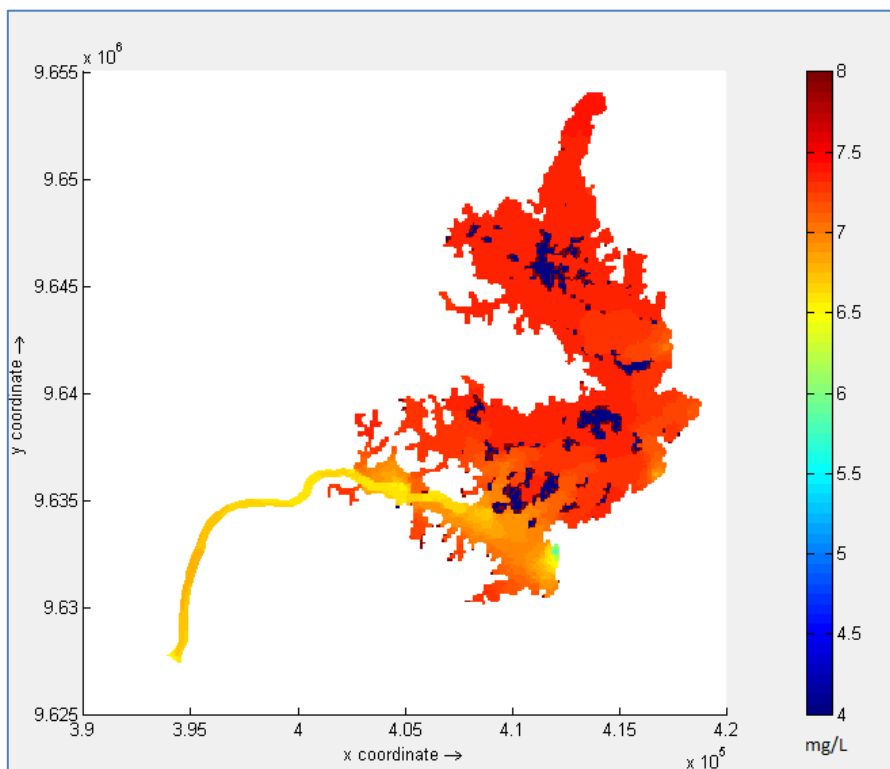
Conforme as vazões afluentes vão se tornando mais intensas (diferentes cenários), variações com concentração definida na condição de contorno (advindas do RX) são observadas no interior do RI. Esse fato fica evidente comparando os resultados obtidos para os cenários 1, 2, 3 e 4 (Figura 131, Figura 132, Figura 133 e Figura 134), nos quais a vazão média devido a operação por pulsos atinge o máximo de 200 m<sup>3</sup>/s no Cenário 4. Até esse cenário as águas com concentração entre 6 e 6,5 mg/L se encontravam confinadas no canal e na porção sul do reservatório. Quando as vazões afluentes atingem os valores mais altos, nos cenários 5 e 6, com máximo de 300 m<sup>3</sup>/s,

durante um período de 12 horas por dia, águas com concentração de OD com valores entre 5,5 e 6,5 mg/L (Figura 135 e Figura 136) podem ser encontradas na superfície de todo o RI. Mas, de forma geral, o reservatório não apresentou regiões com OD abaixo de 5 mg/L.

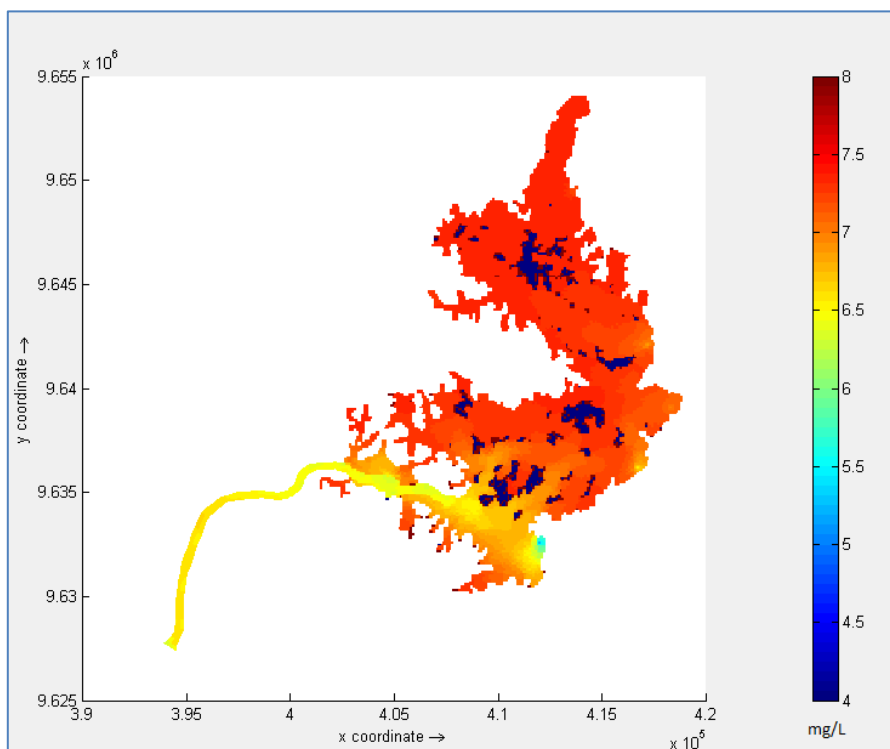
A Figura 137 apresenta o resultado da distribuição superficial de OD em função das forçantes definidas para o Cenário 7. A condição inicial de OD para esse cenário foi de 5,7 mg/L, uniformemente distribuída; o resultado obtido mostra que as menores concentrações dessa substância ocorrem nas áreas mais rasas do RI. Os menores valores observados foram da ordem de 5,1 mg/L, valor acima do limite legal mínimo estabelecido para corpos hídricos de Classe 2. A Figura 137 apresenta o resultado da distribuição superficial de OD obtida com as forçantes definidas para o Cenário 7. Os menores valores observados se concentram na porção norte, próximo à saída do Reservatório Intermediário, nessa região o OD atingiu valores da ordem de 5,2 mg/L.



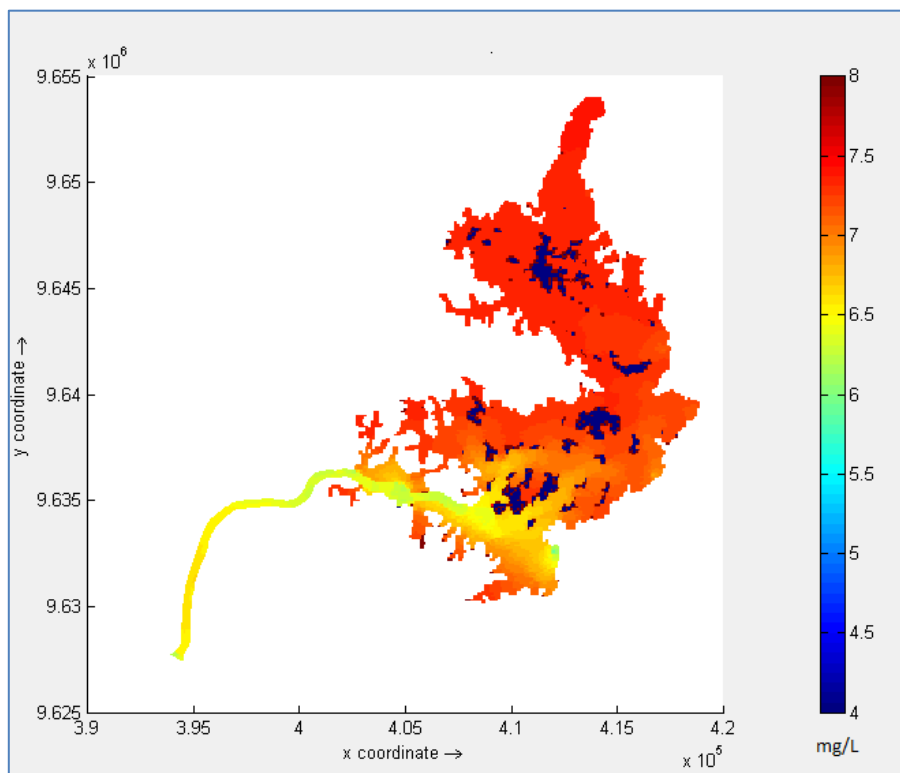
**Figura 131: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



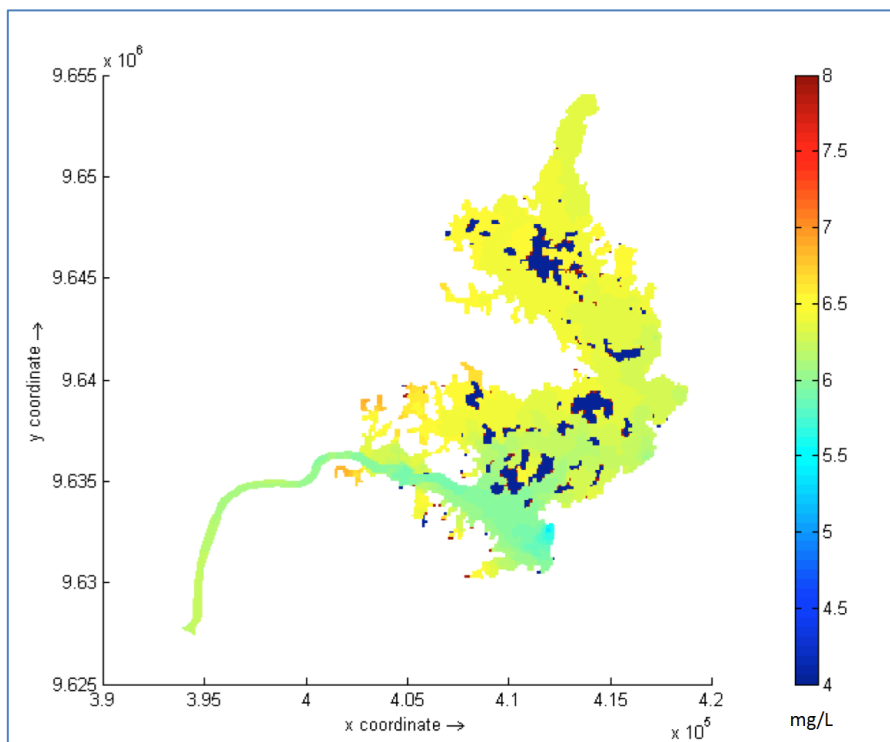
**Figura 132: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



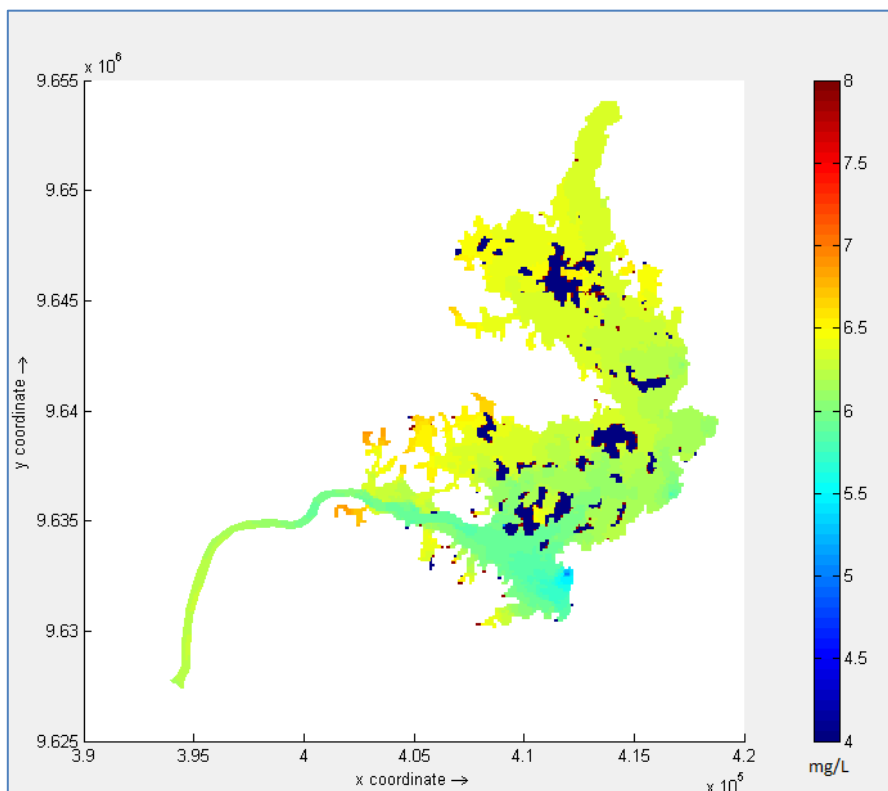
**Figura 133: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3**



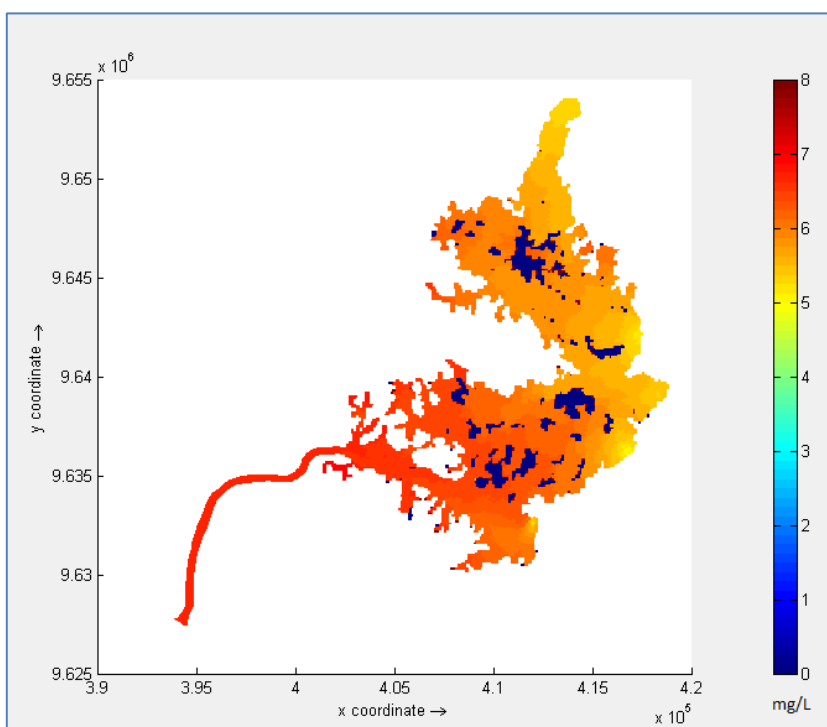
**Figura 134: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4**



**Figura 135: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5**



**Figura 136: Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6**

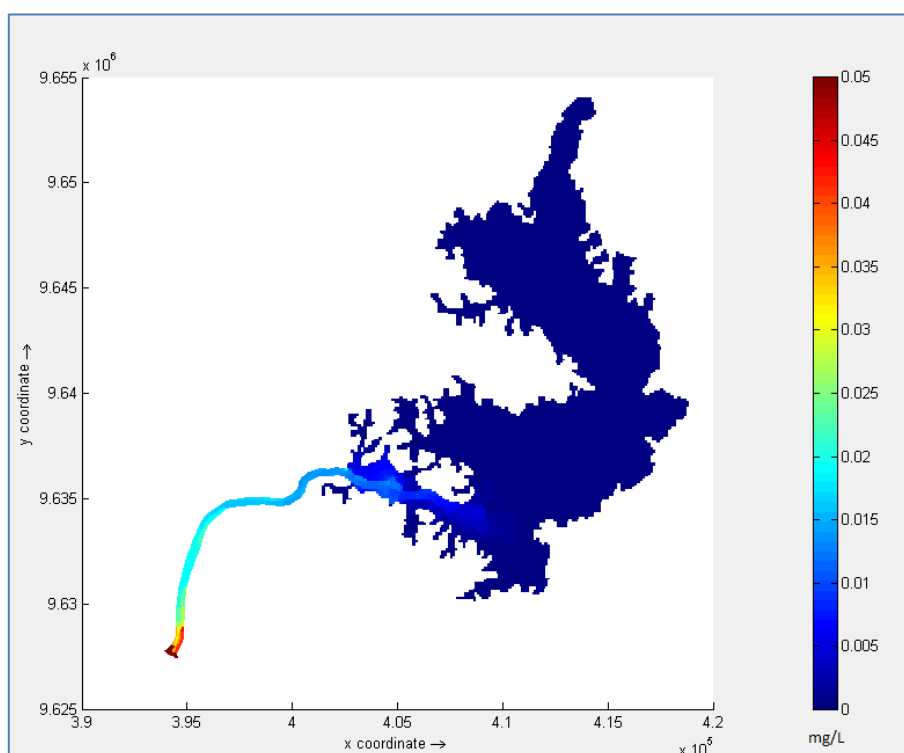


**Figura 137. Concentração superficial de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7**



#### 5.4.2. Resultados para DBO

A distribuição espacial das concentrações de DBO, apresentada na Figura 138, mostra que os maiores valores de DBO se encontram no Canal de Derivação, e decaem rapidamente dentro do RI. É importante notar que a escala de concentração utilizada na produção das distribuições superficiais de DBO possui valor máximo de 0,05 mg/L (valor bem abaixo do limite legal estabelecido para corpos hídricos de classe 2, que é de 5,0 mg/L) para permitir visualizar o espalhamento da pluma no interior do RI. Analisando o Cenário 6 (Figura 139), que se caracteriza como sendo o extremo em termos de vazão afluente quando comparado ao Cenário 1 (Figura 138), observa-se que as maiores concentrações de DBO dominam o canal de acesso e a porção sul do reservatório. Como os Cenários 1 e 6 não mostraram problemas em relação a DBO, optou-se por não se expor os resultados para os cenários intermediários. Para o Cenário 7, onde não há vazão afluente através do Canal de Derivação, a distribuição espacial de DBO, em 15 de setembro, é apresentada na Figura 140, onde se observa que as concentrações são muito próximas de 0,0 mg/L.



**Figura 138: Concentração superficial de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**

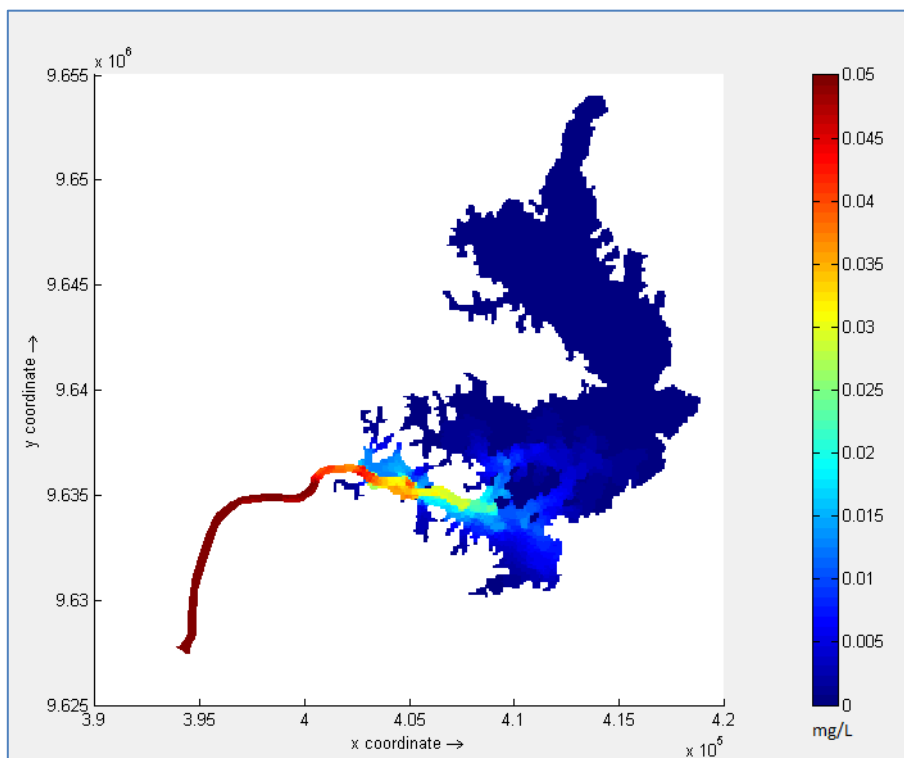


Figura 139: Concentração superficial de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6

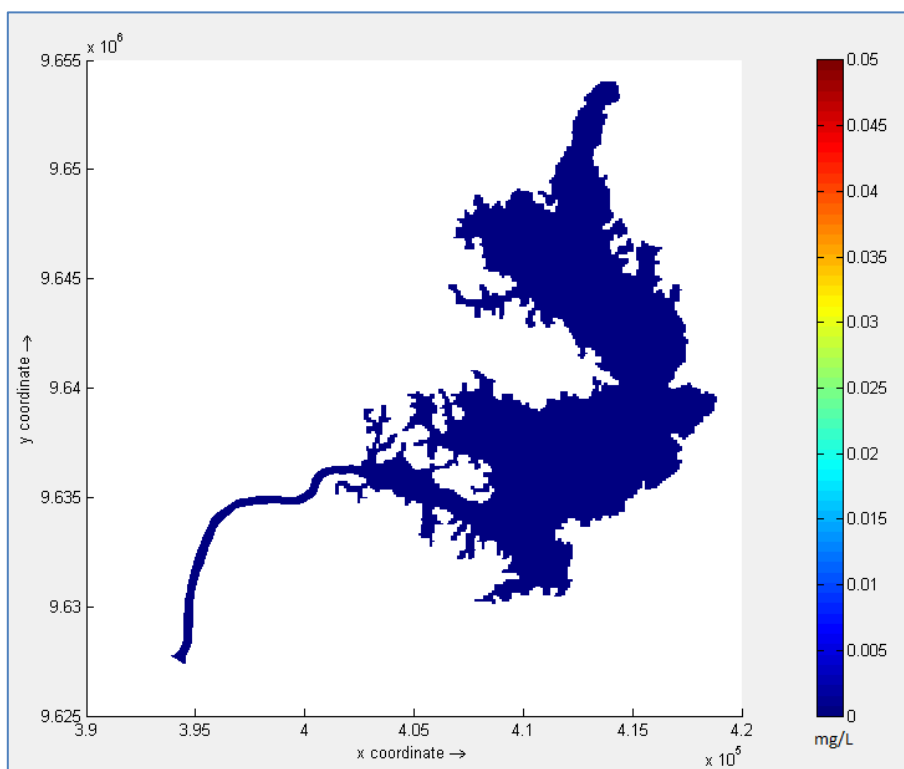


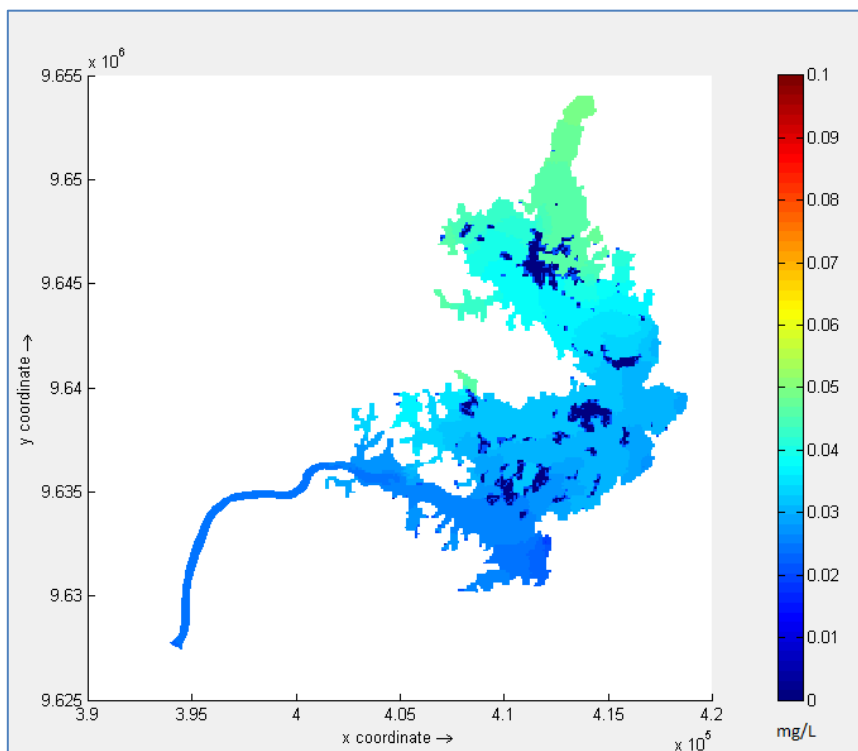
Figura 140: Concentração superficial de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.

#### 5.4.3. **Resultados para Fósforo Total**

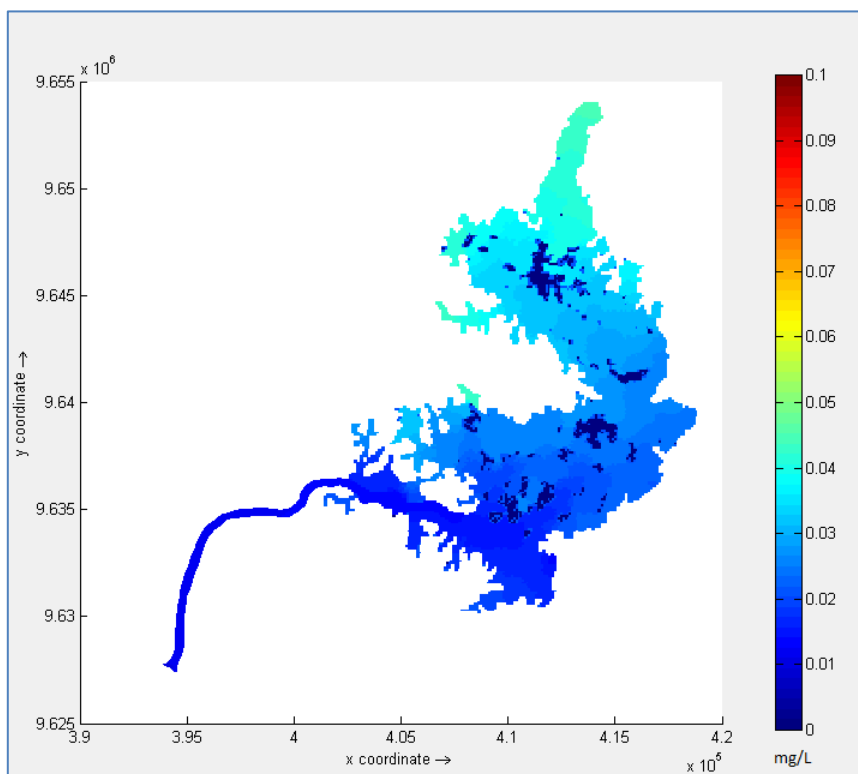
A Figura 141 apresenta a distribuição superficial de Fósforo Total obtida para o Cenário 1. Observa-se que as menores concentrações ocorrem na porção sul do reservatório, variando entre 0,01 e 0,02 mg/L e concentrações um pouco mais elevadas ocorrem na porção norte, com máximo atingindo 0,05 mg/L, valor igual ao limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para ambientes intermediários de classe 2.

À medida que as vazões se tornam mais intensas nos outros cenários, as concentrações de fósforo, no limite norte do reservatório, diminuem até atingir o valor mínimo – da ordem de 0,02 mg/L – no Cenário 6 (Figura 146). Esse comportamento também pode ser observado na Figura 142 até a Figura 145, respectivamente cenários 2, 3, 4 e 5.

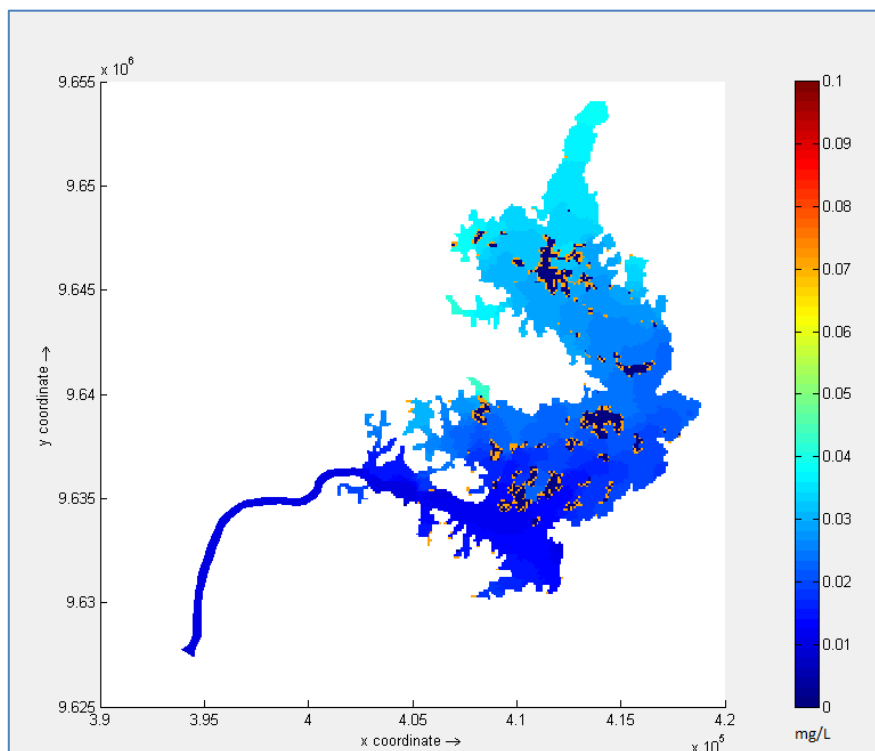
Para o Cenário 7, cuja distribuição espacial é apresentada na Figura 147, as concentrações são da ordem de 0,07 mg/L. Deve-se considerar que esta é uma variação espacial totalmente distinta das demais. Isso ocorre por não haver diluição da massa de água uma vez que não existe afluência oriunda do RX; assim, o principal fator que se observa, é o espalhamento de fósforo pela superfície do reservatório devido à ação dos ventos.



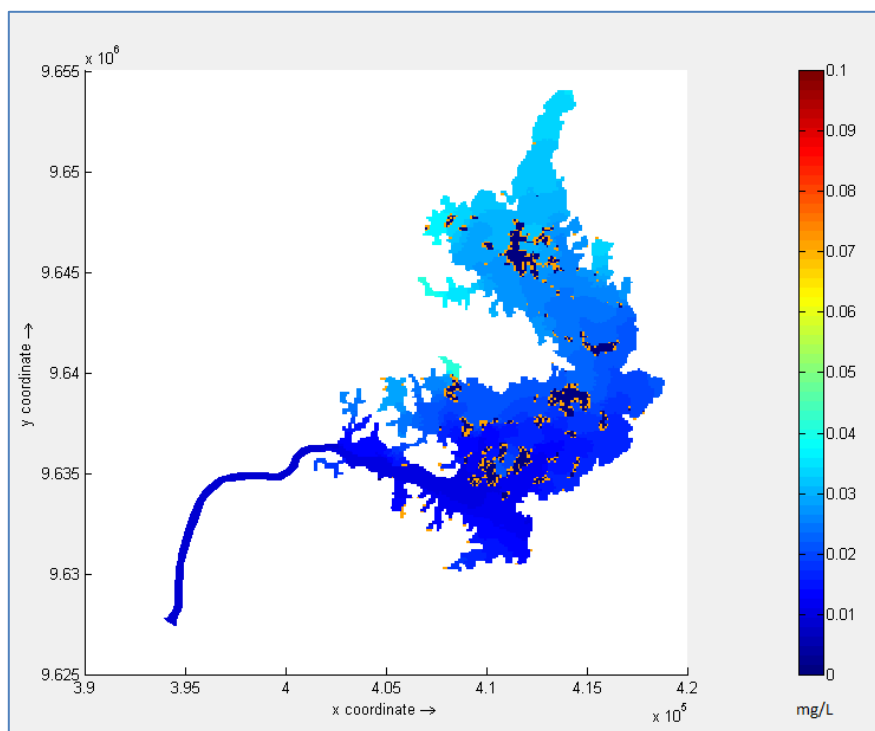
**Figura 141: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



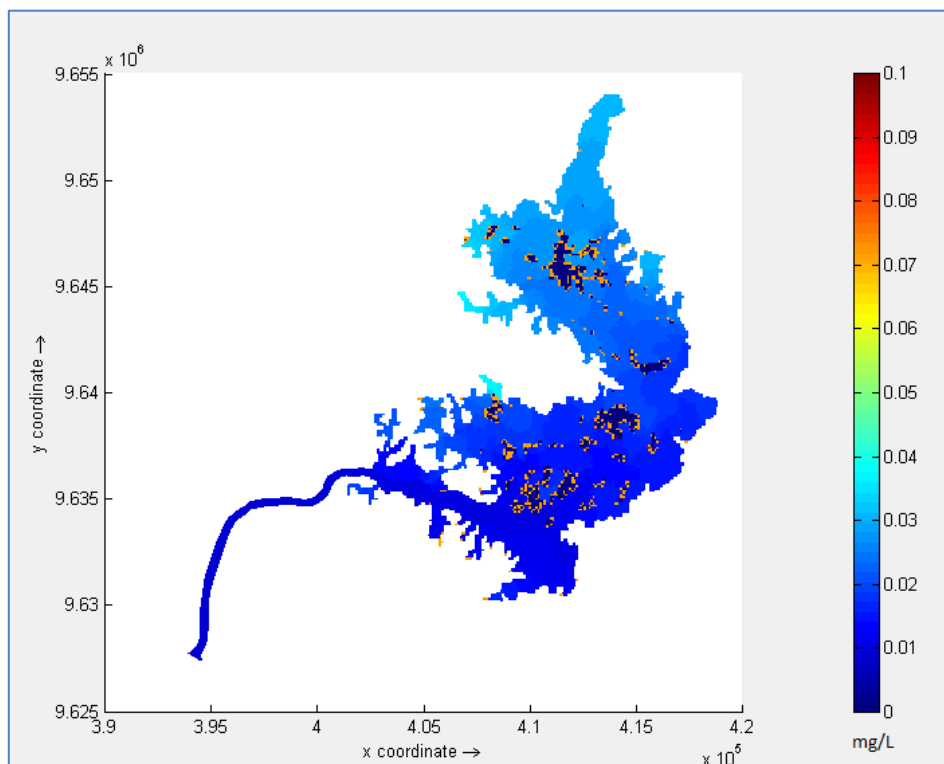
**Figura 142: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



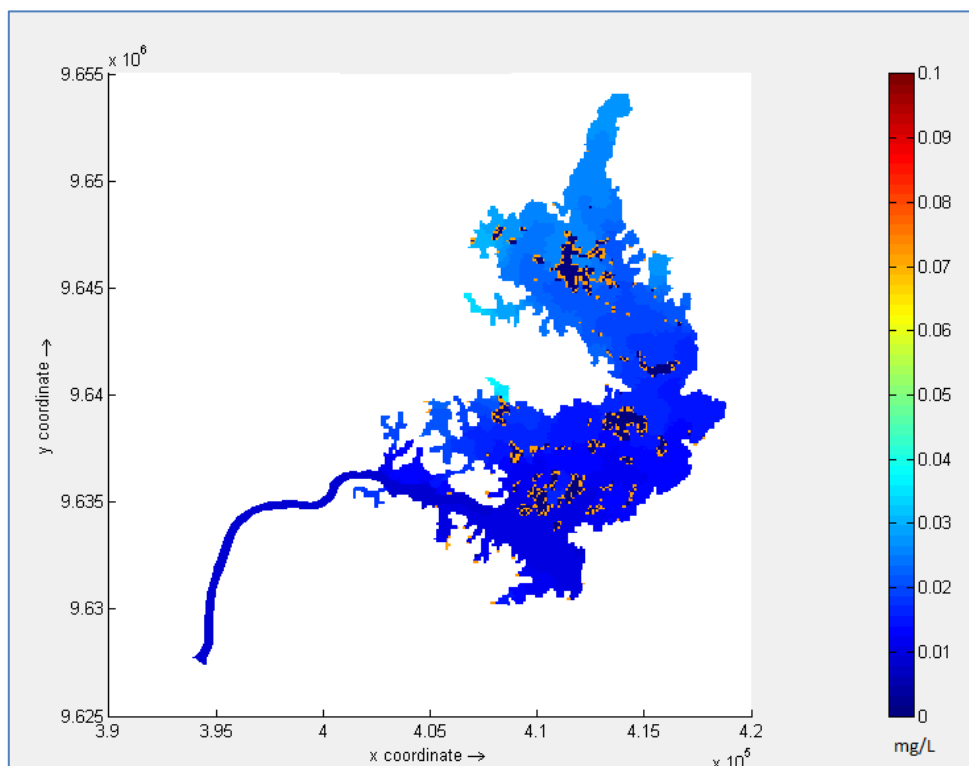
**Figura 143: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



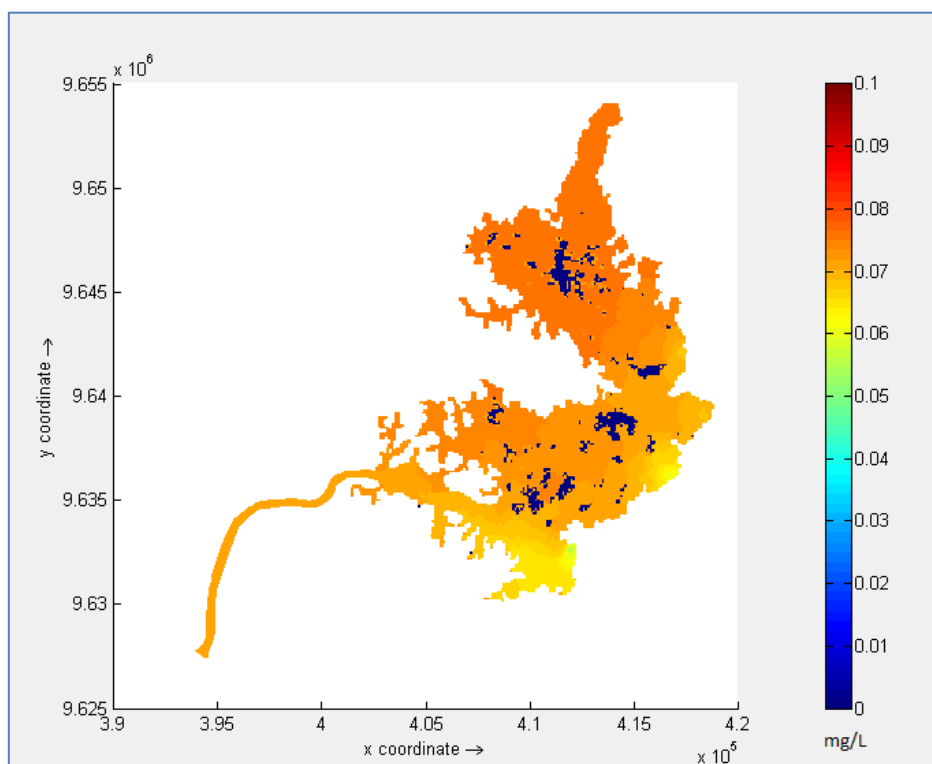
**Figura 144: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 145: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



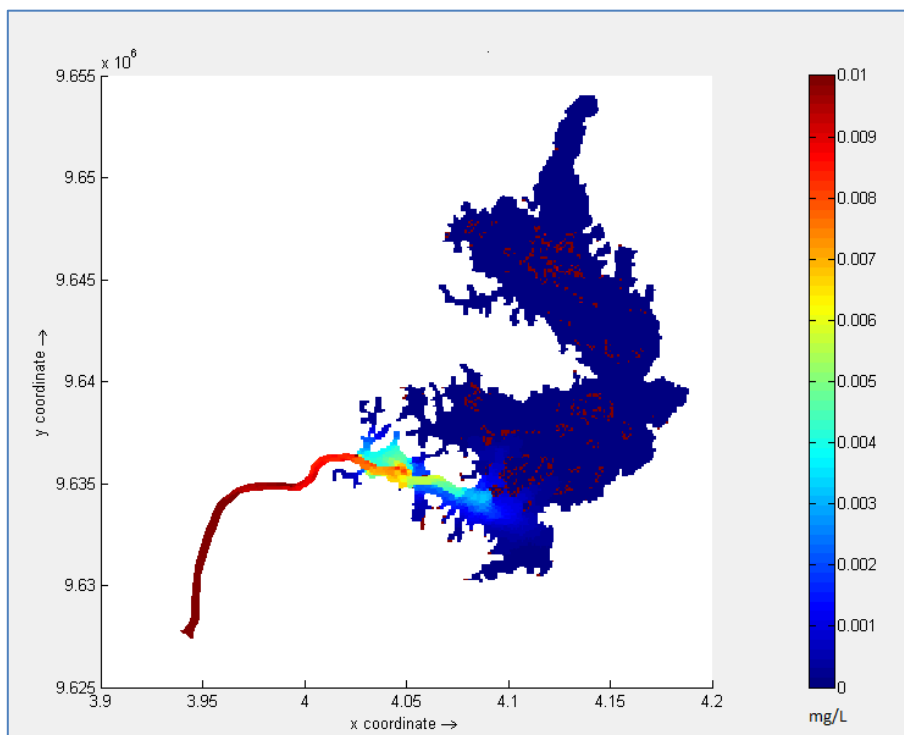
**Figura 146: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



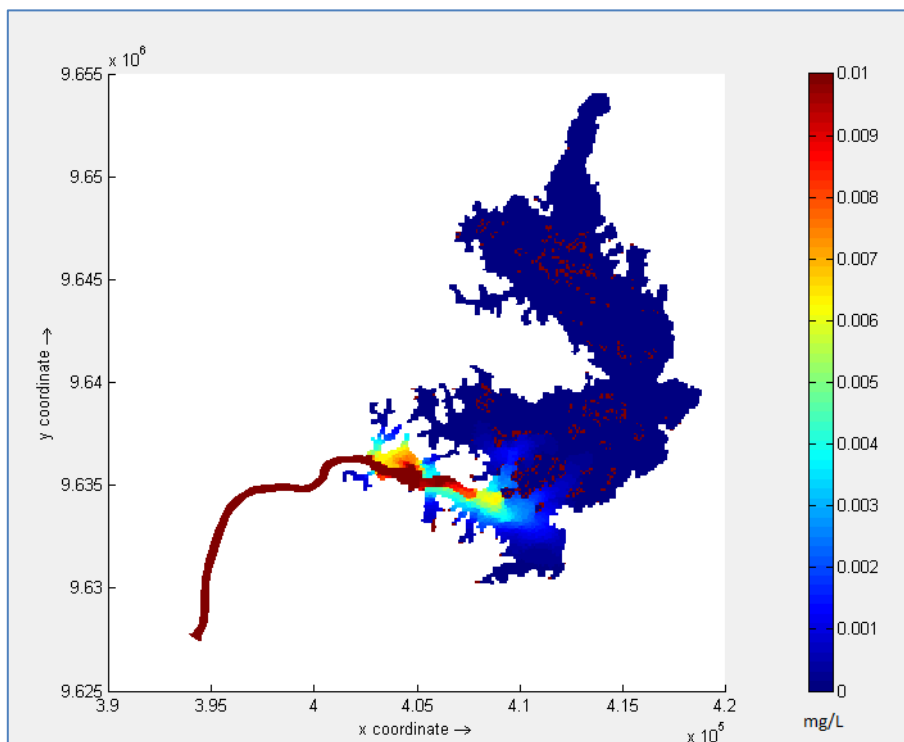
**Figura 147: Concentração superficial de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

#### 5.4.4. **Resultados para Amônia**

Os resultados das distribuições espaciais de Amônia para os cenários 1 a 7, são apresentados nas Figura 148 a Figura 154. Basicamente a variação espacial desse parâmetro é definida pela vazão do fluxo afluyente através do Canal de Derivação, oriundo do Reservatório Xingu. O comportamento é análogo ao observado na análise dos resultados da concentração do fósforo, apresentado anteriormente. Ou seja, na medida em que as vazões se intensificam, entre os cenários 1 a 6, a massa de água oriunda do RX, avança para o interior do reservatório e as concentrações diminuem. Os maiores valores ocorrem na região do canal e apresentam valores da ordem de 0,01 mg/L.

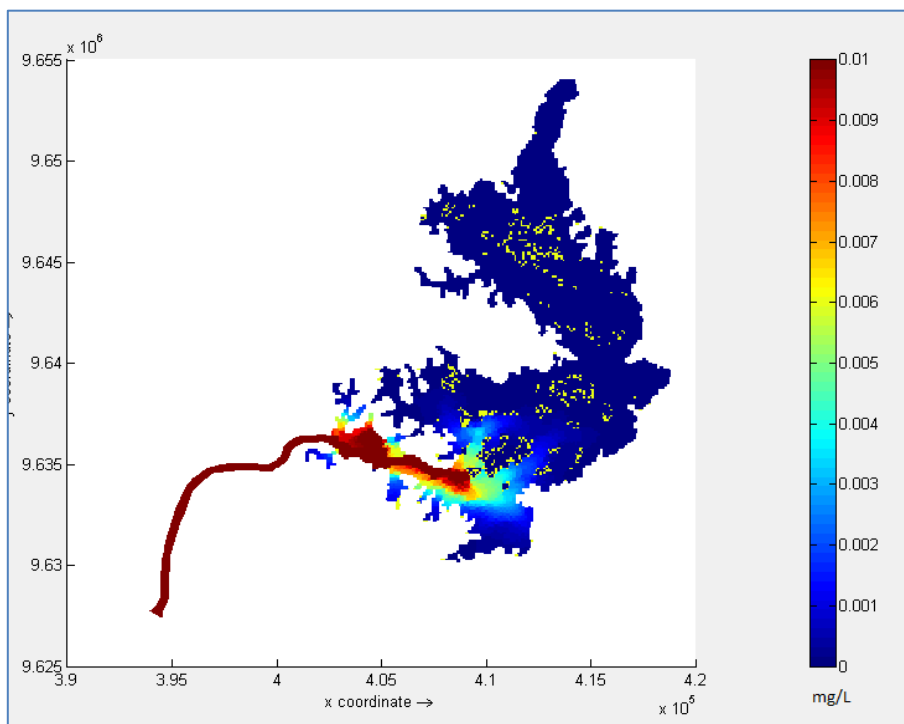


**Figura 148: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**

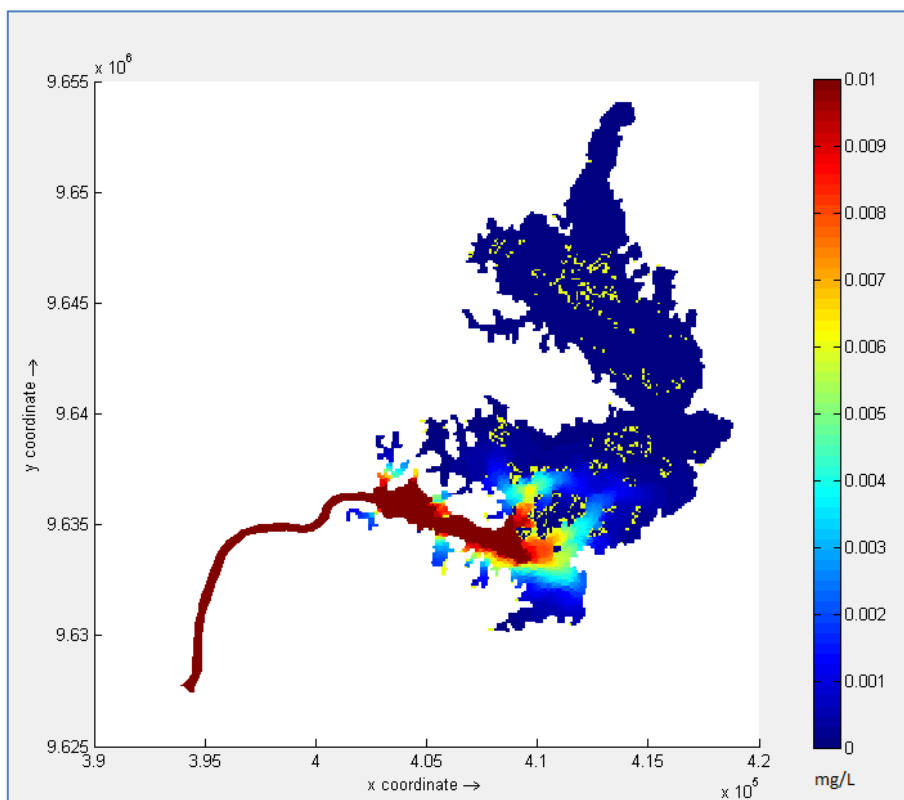


**Figura 149: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**

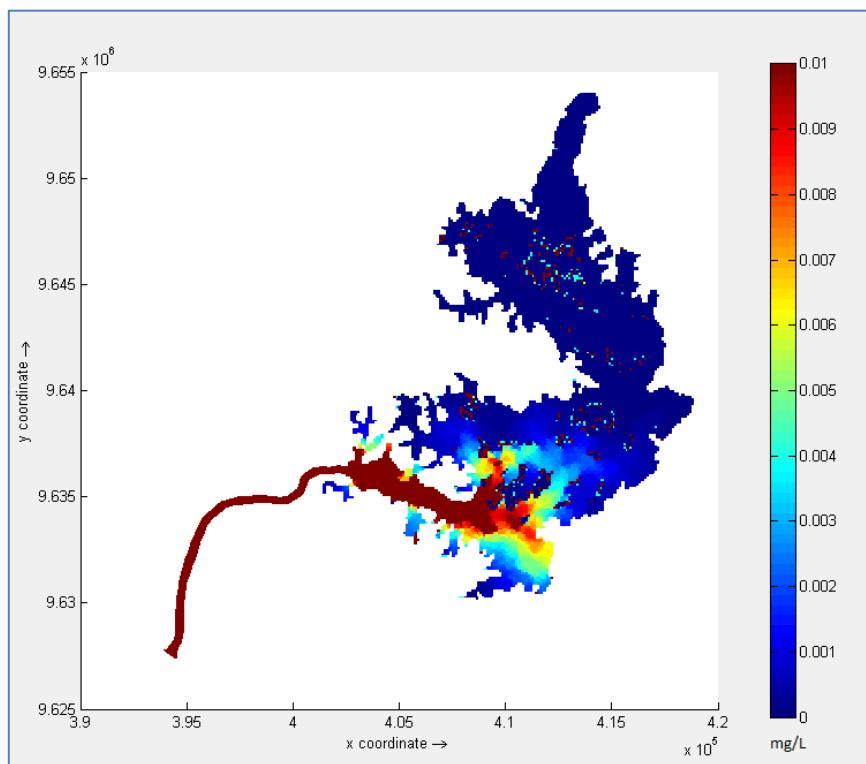




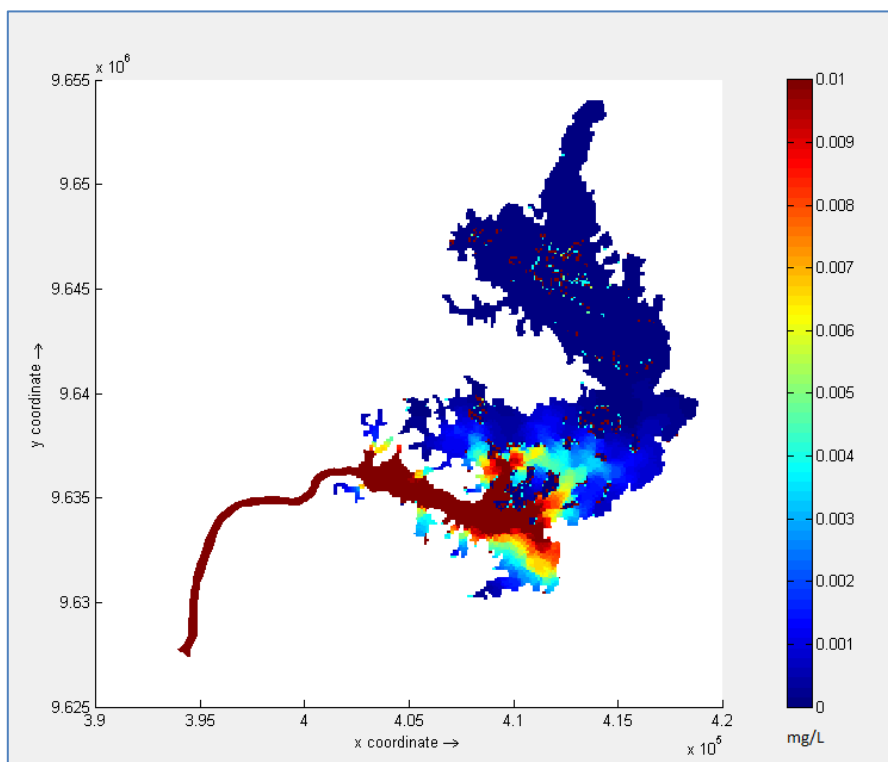
**Figura 150: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



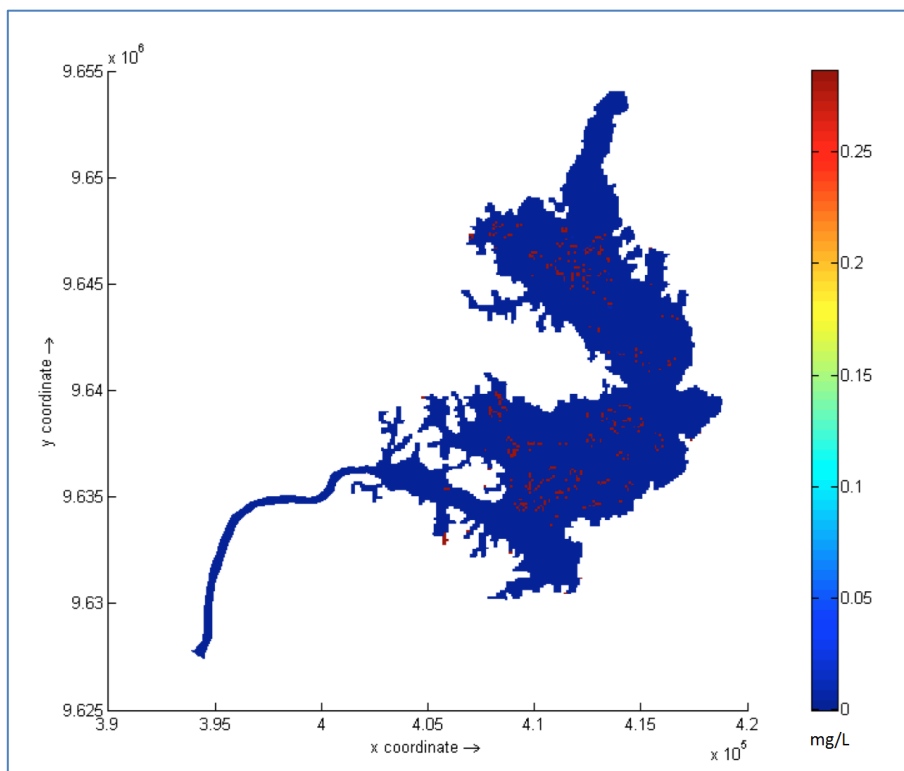
**Figura 151: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 152: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



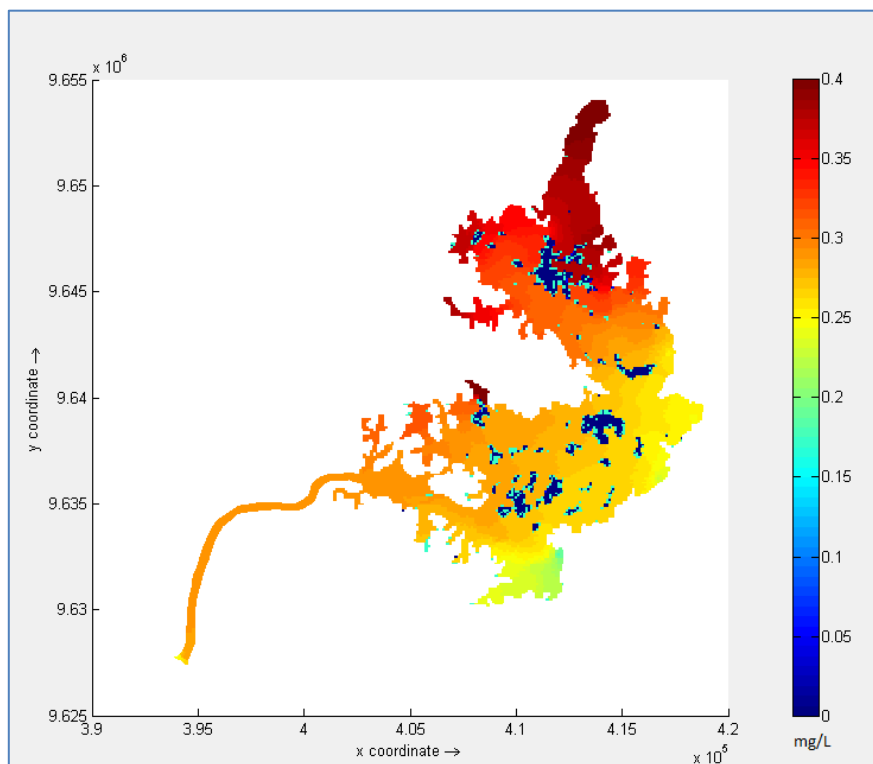
**Figura 153: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



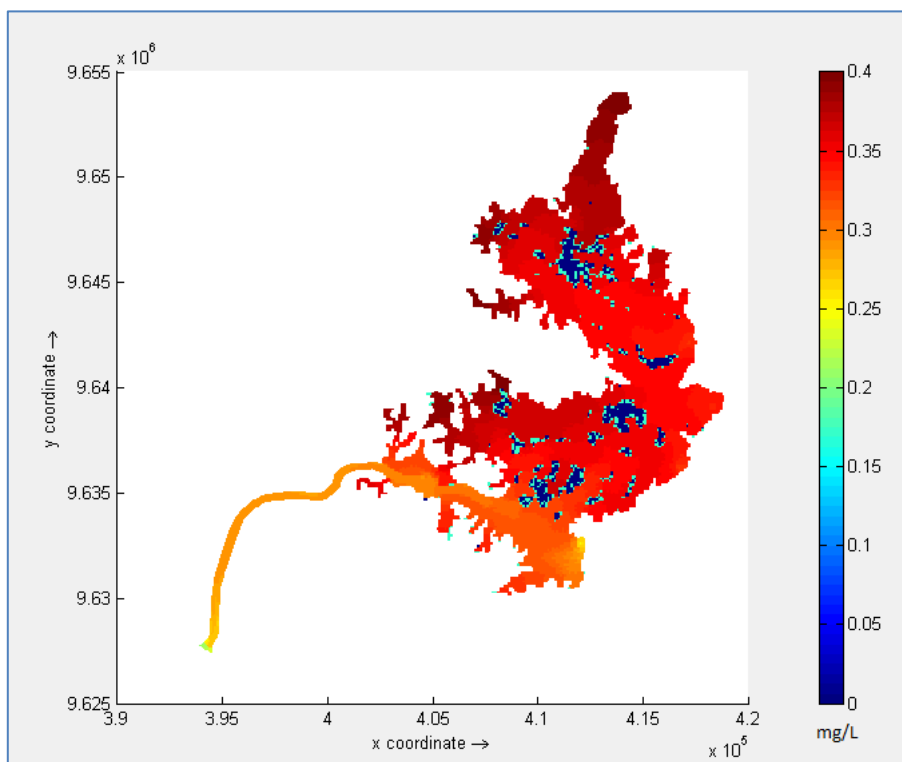
**Figura 154: Concentração superficial de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

#### 5.4.5. **Resultados para Nitrato**

As concentrações superficiais de nitrato são apresentadas da Figura 155 até a Figura 161. Os resultados mostram maiores concentrações na porção norte do reservatório com valores da ordem de 0,4 mg/L e menores concentrações na região sul do reservatório, com valores mínimos de 0,2 mg/L.



**Figura 155: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



**Figura 156: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**

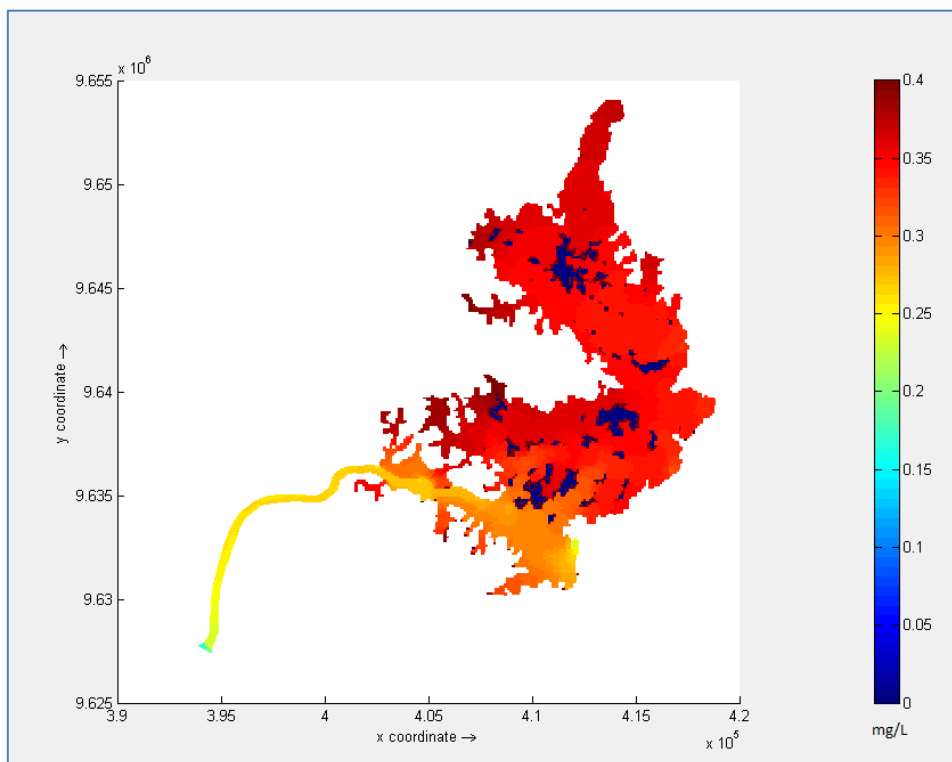


Figura 157: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.

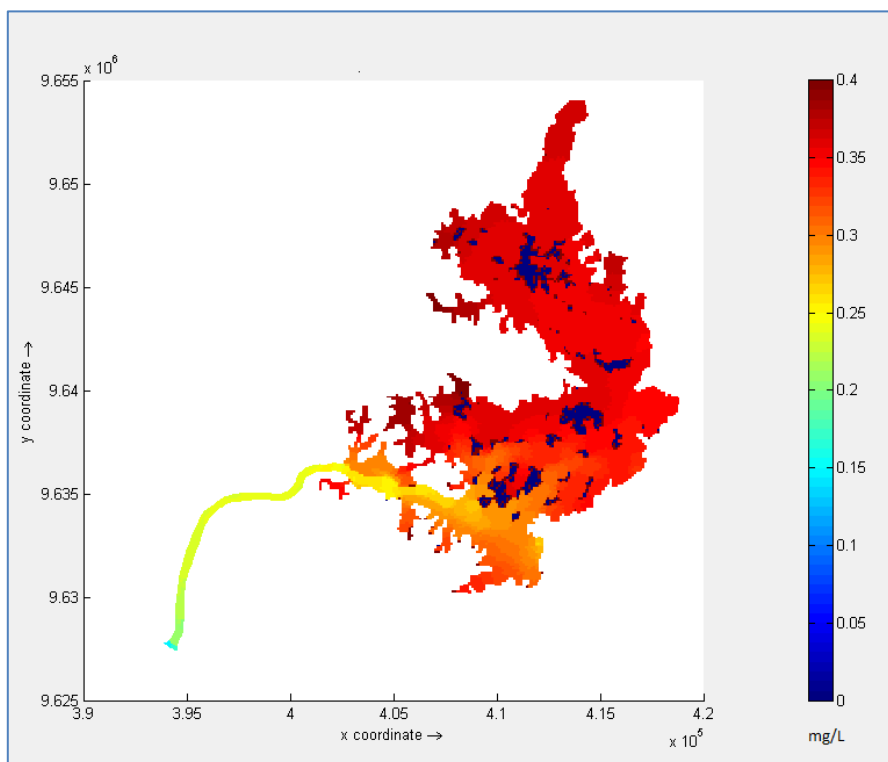
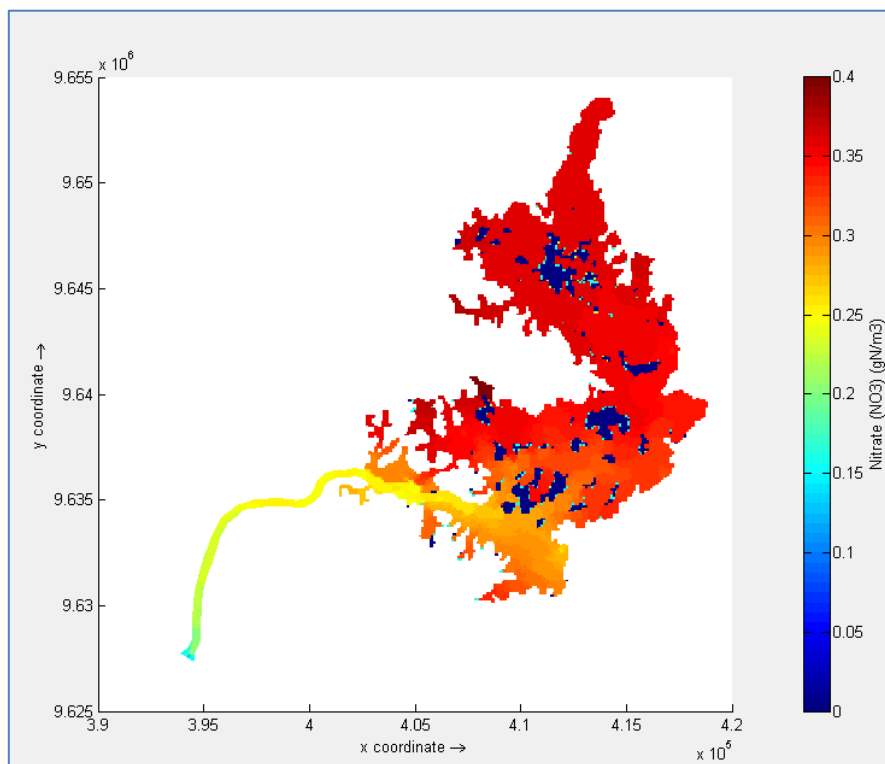
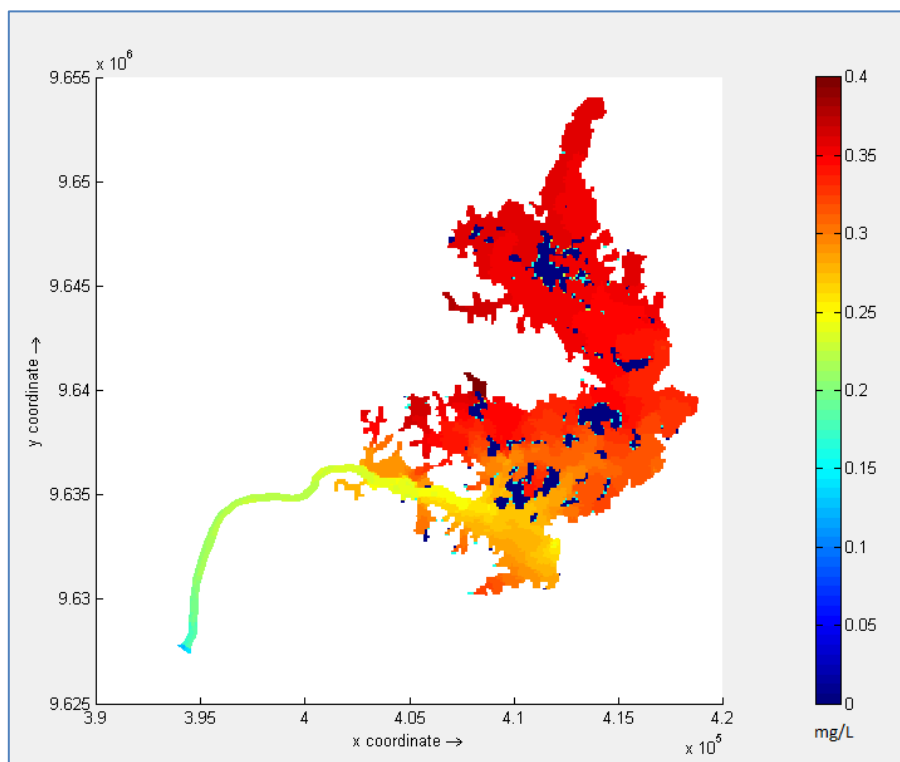


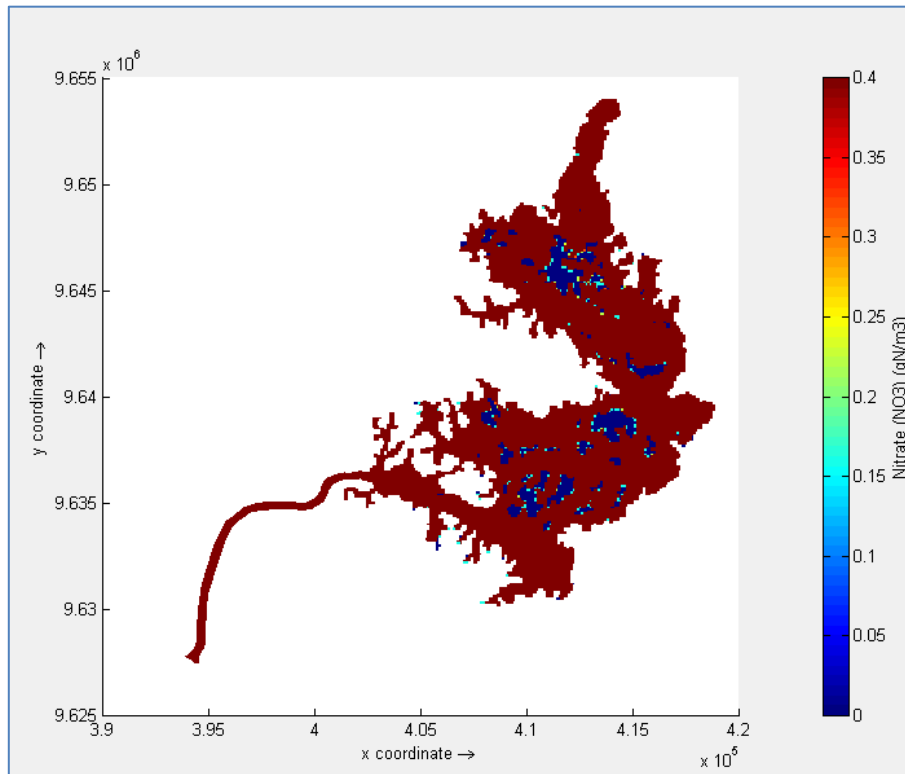
Figura 158: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.



**Figura 159: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



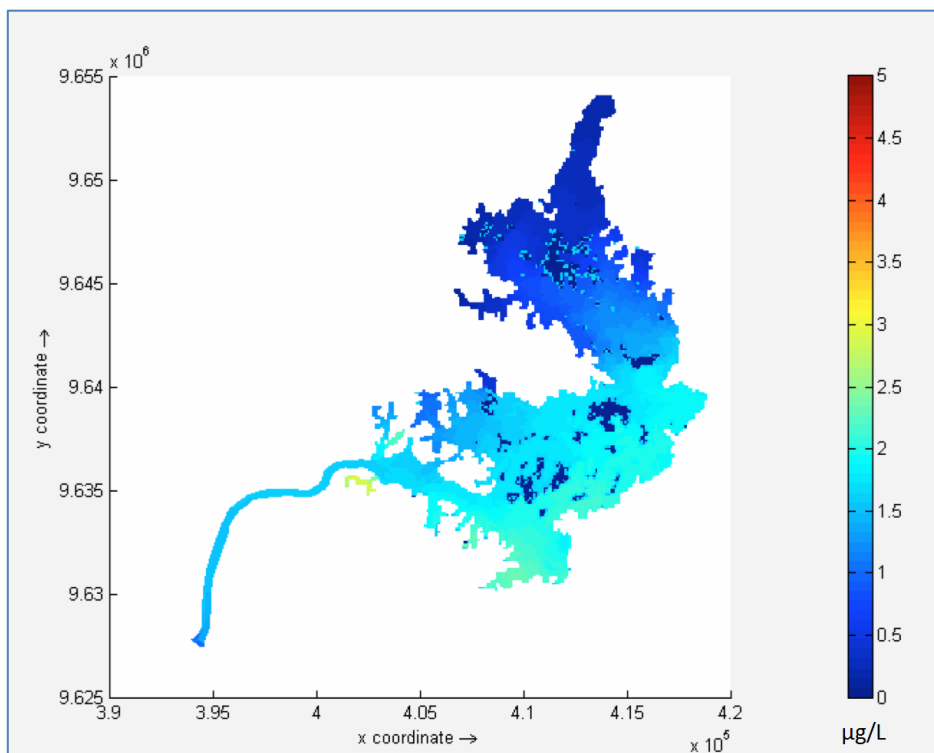
**Figura 160: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



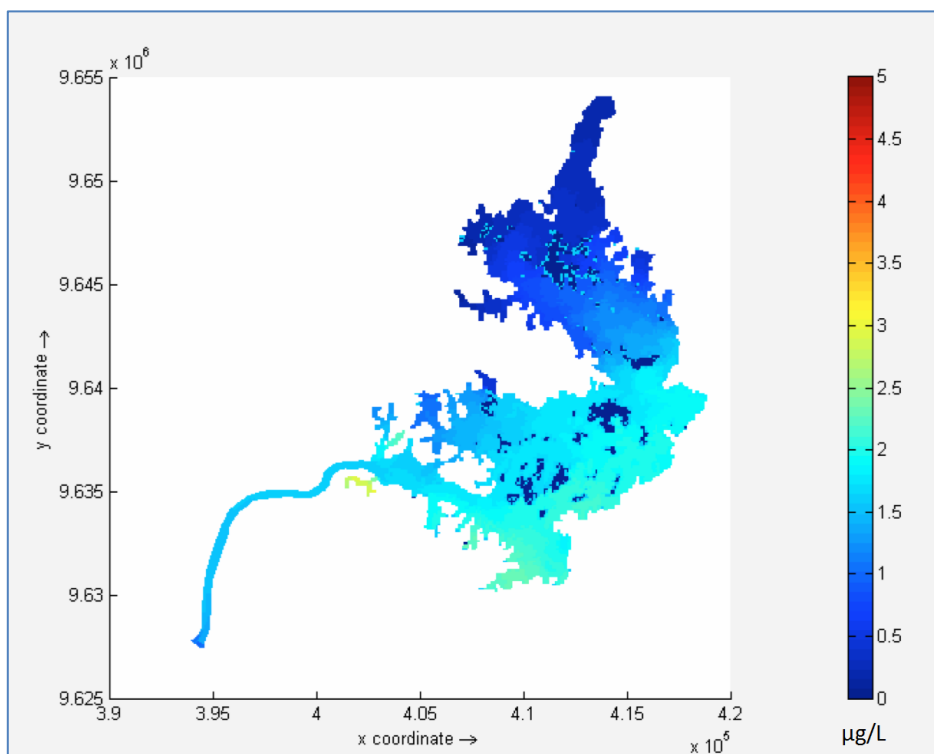
**Figura 161: Concentração superficial Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

#### 5.4.6. *Resultados para Clorofila-a*

A Figura 162 até a Figura 168 apresentam as distribuições espaciais das concentrações de Clorofila-a para os sete cenários simulados. A Clorofila-a, parâmetro diretamente relacionado com a quantidade de algas, apresentou-se sempre abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de classe 2, ou seja, 30  $\mu\text{g/L}$ . Os valores máximos obtidos nas simulações são da ordem de 2,5  $\mu\text{g/L}$ . Observa-se ainda uma padronização da distribuição espacial entre todos os cenários, sendo que as maiores concentrações ocorrem na parte sul do Reservatório Intermediário e as menores se concentram na parte norte. Para o Cenário 7 não há presença de Clorofila-a e a distribuição espacial apresentou valores nulos para todo o domínio modelado.

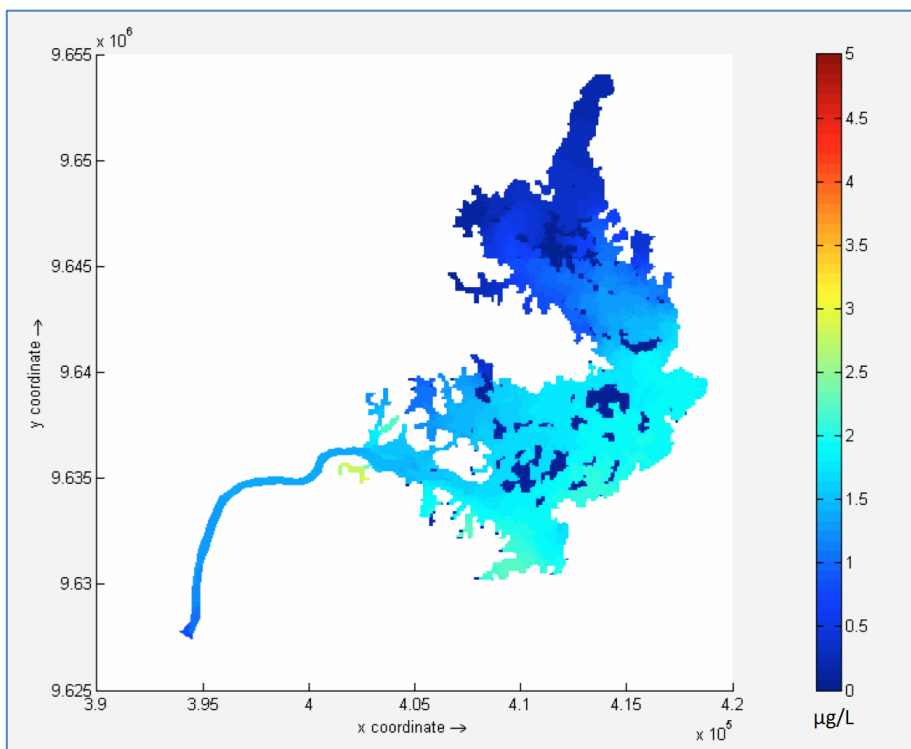


**Figura 162: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**

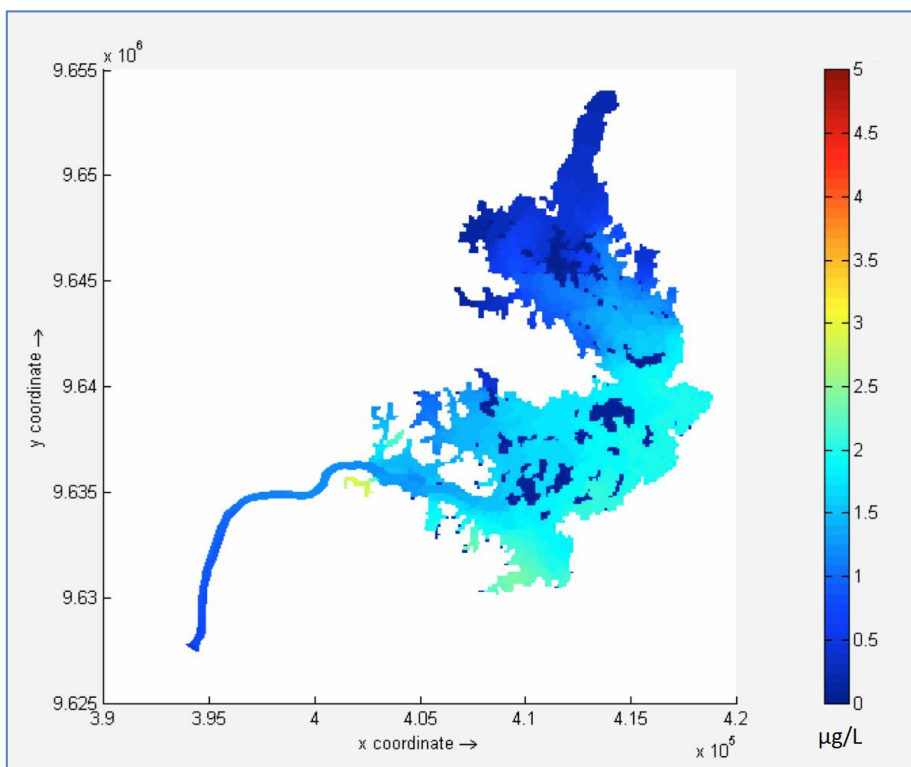


**Figura 163: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**

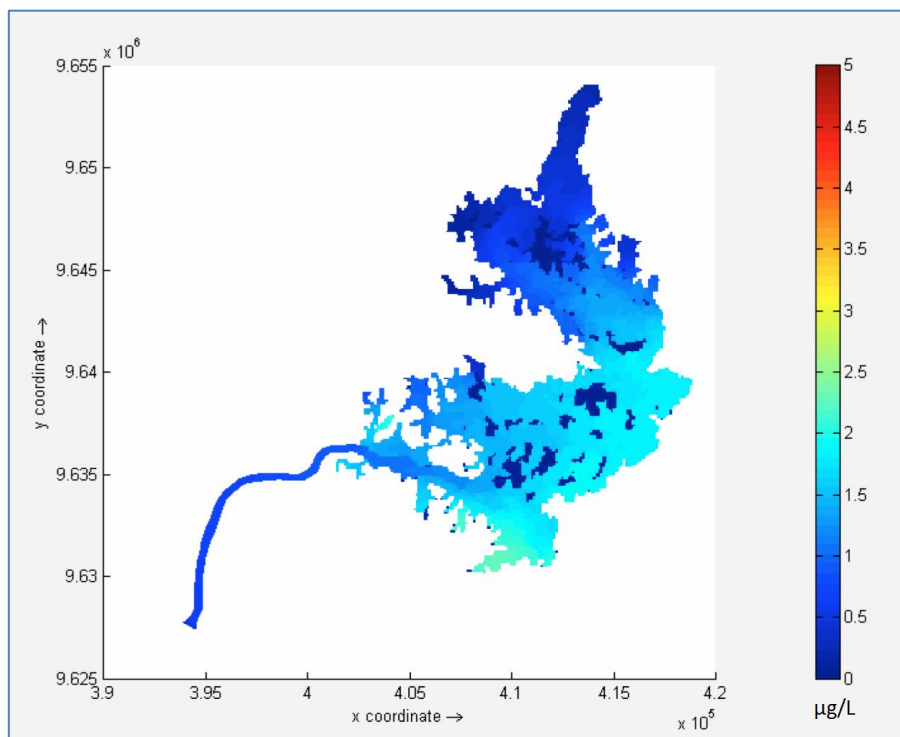




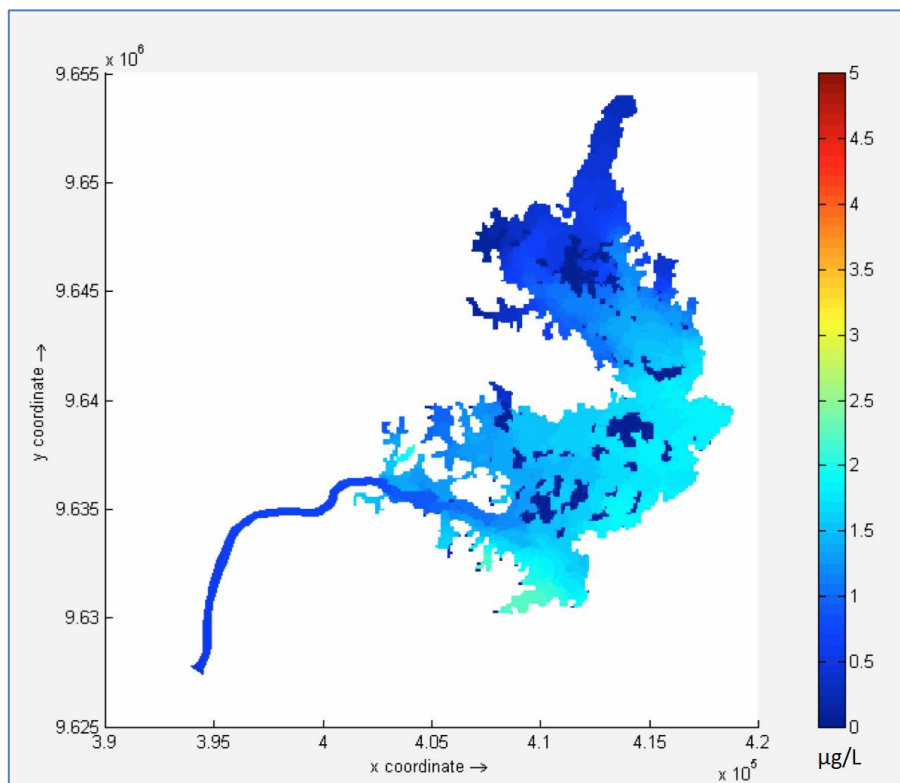
**Figura 164: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



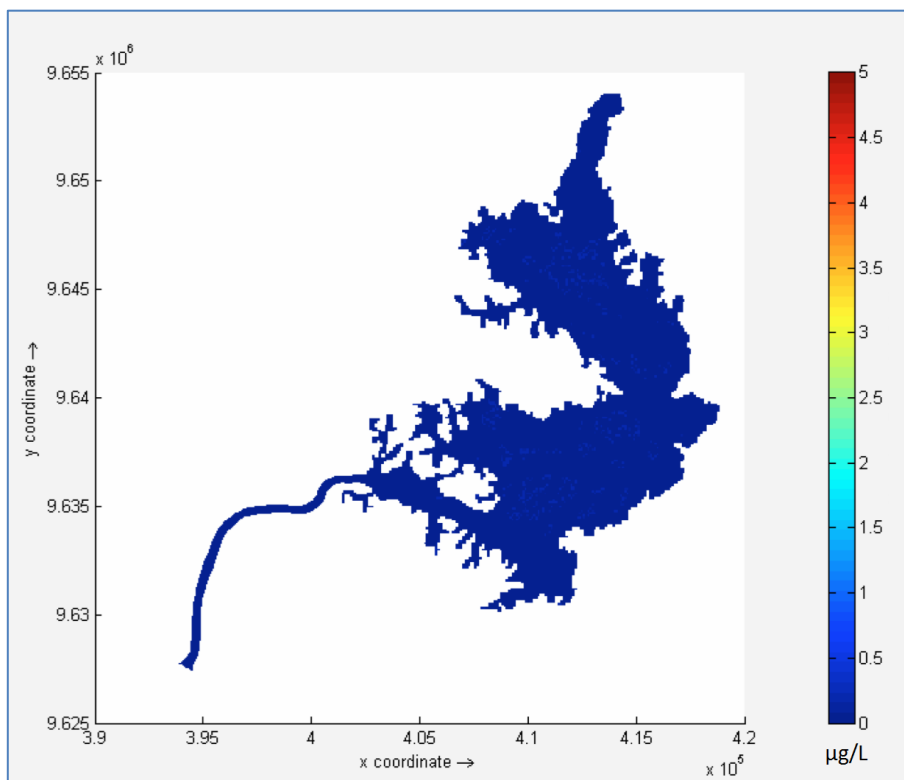
**Figura 165: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 166: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



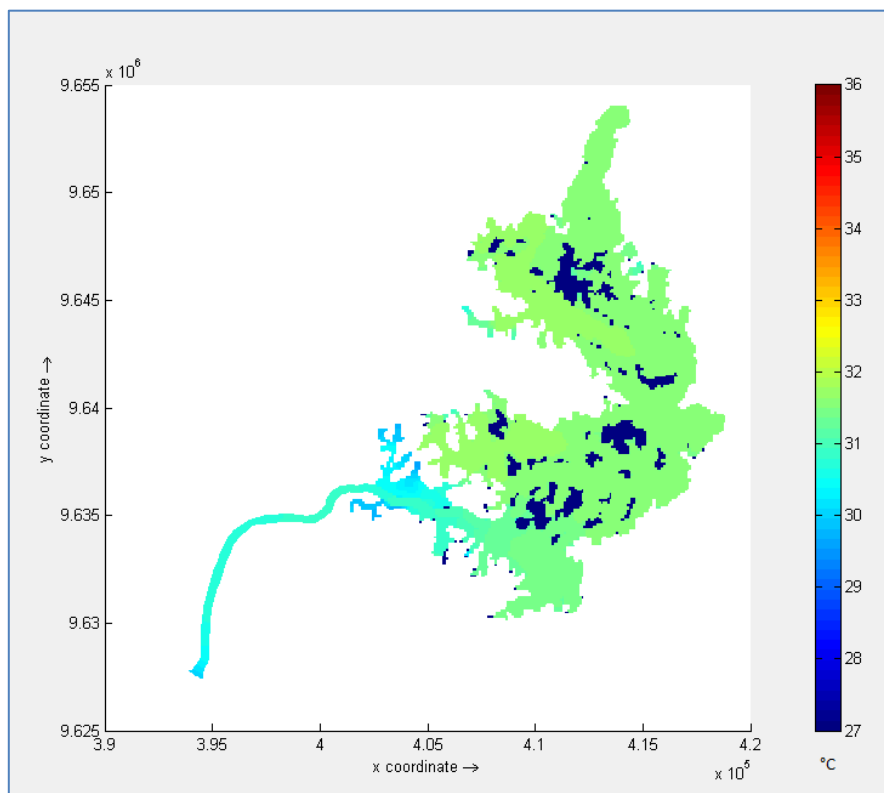
**Figura 167: Concentração superficial Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



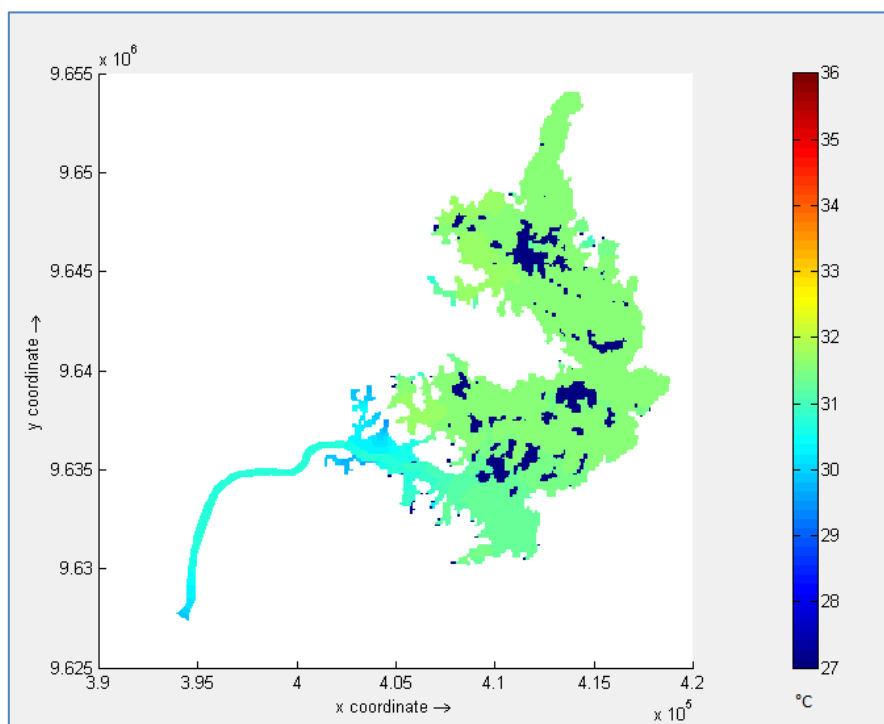
**Figura 168: Concentração superficial de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

#### 5.4.7. *Resultados para Temperatura*

Os campos de temperatura para os cenários simulados são apresentados da Figura 169 até a Figura 175. Para os cenários 1 a 4, as variações de temperatura ficam entre 30°C e 33°C. Já para os cenários 5 a 7 as temperaturas máximas apresentam valores um pouco superiores, chegando a 35°C.



**Figura 169: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



**Figura 170: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**

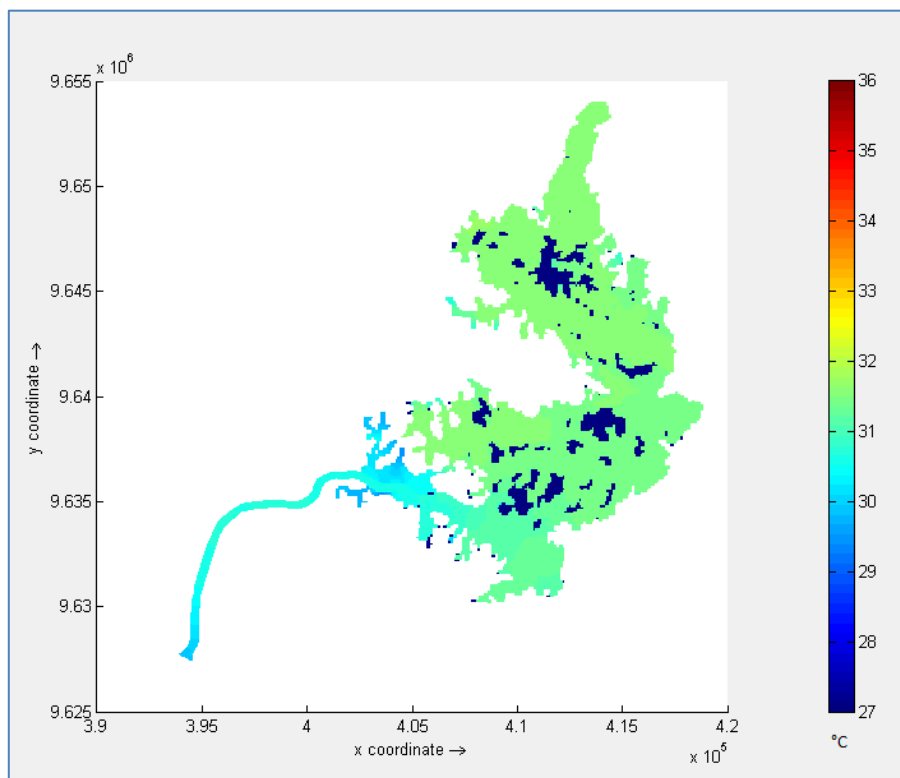


Figura 171: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.

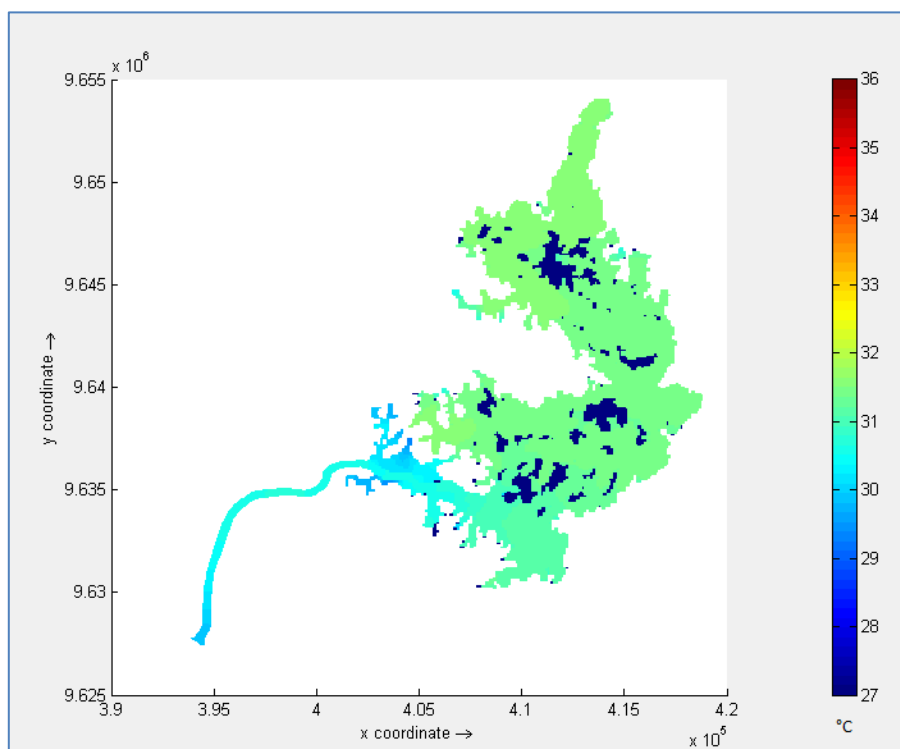
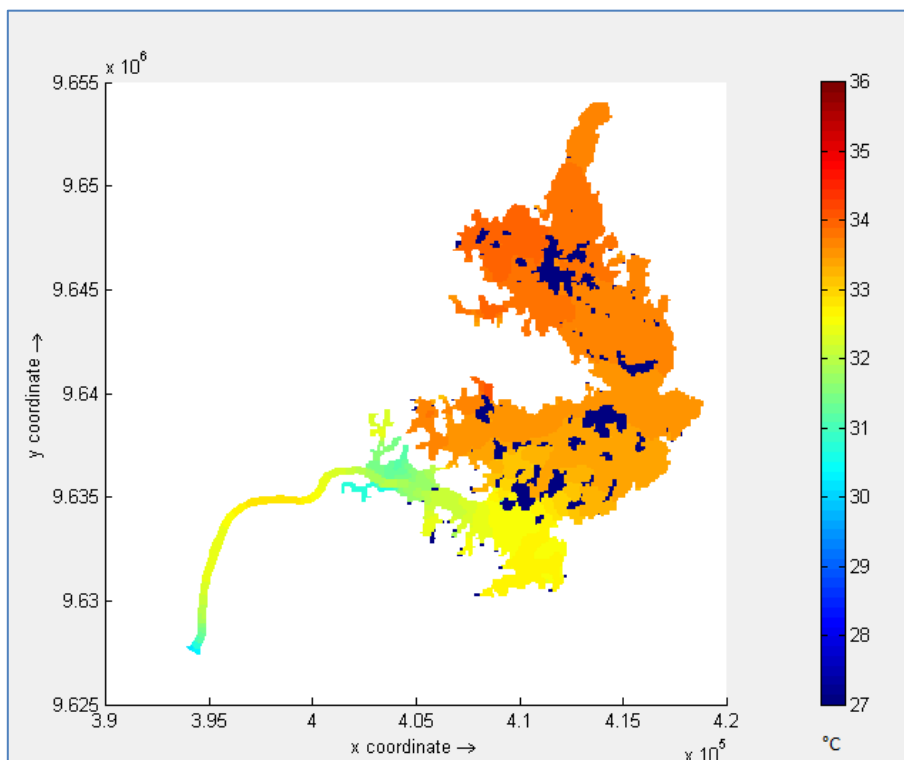
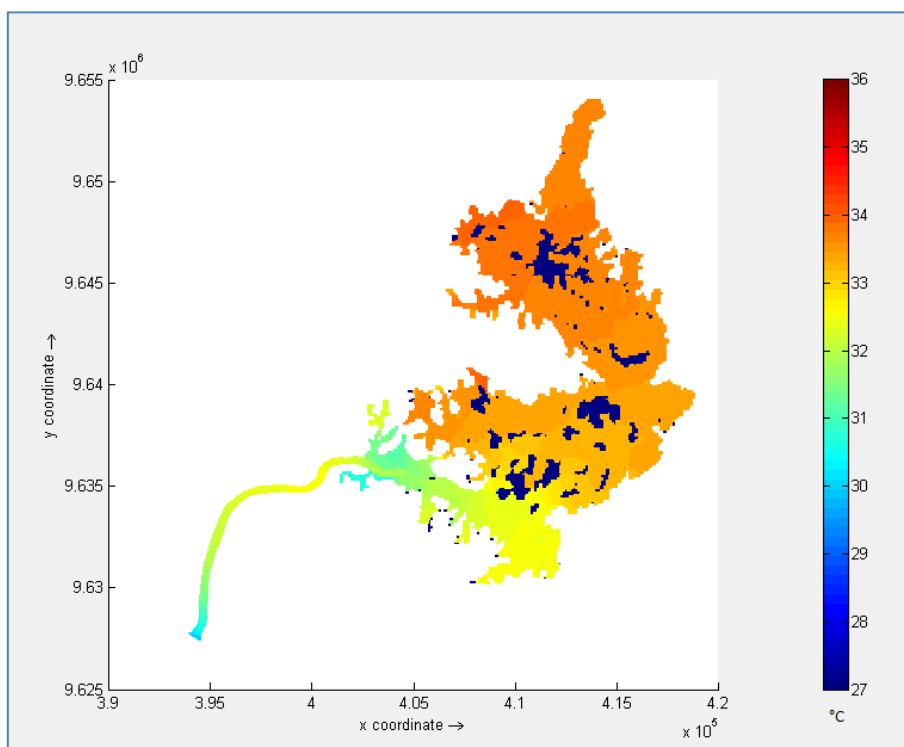


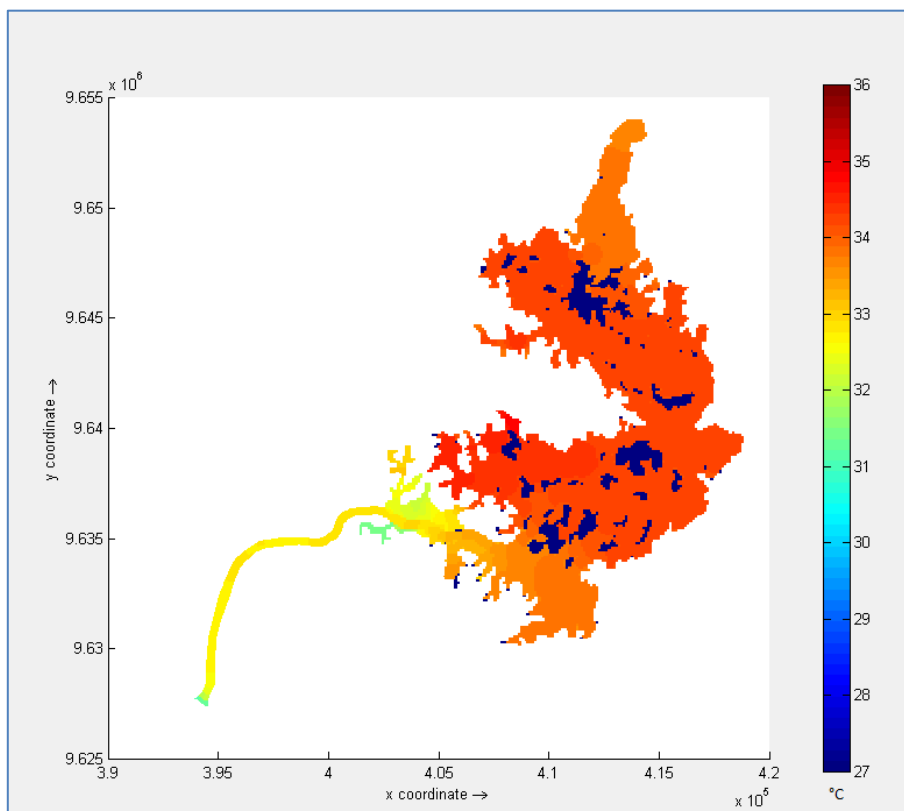
Figura 172: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.



**Figura 173: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 174: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



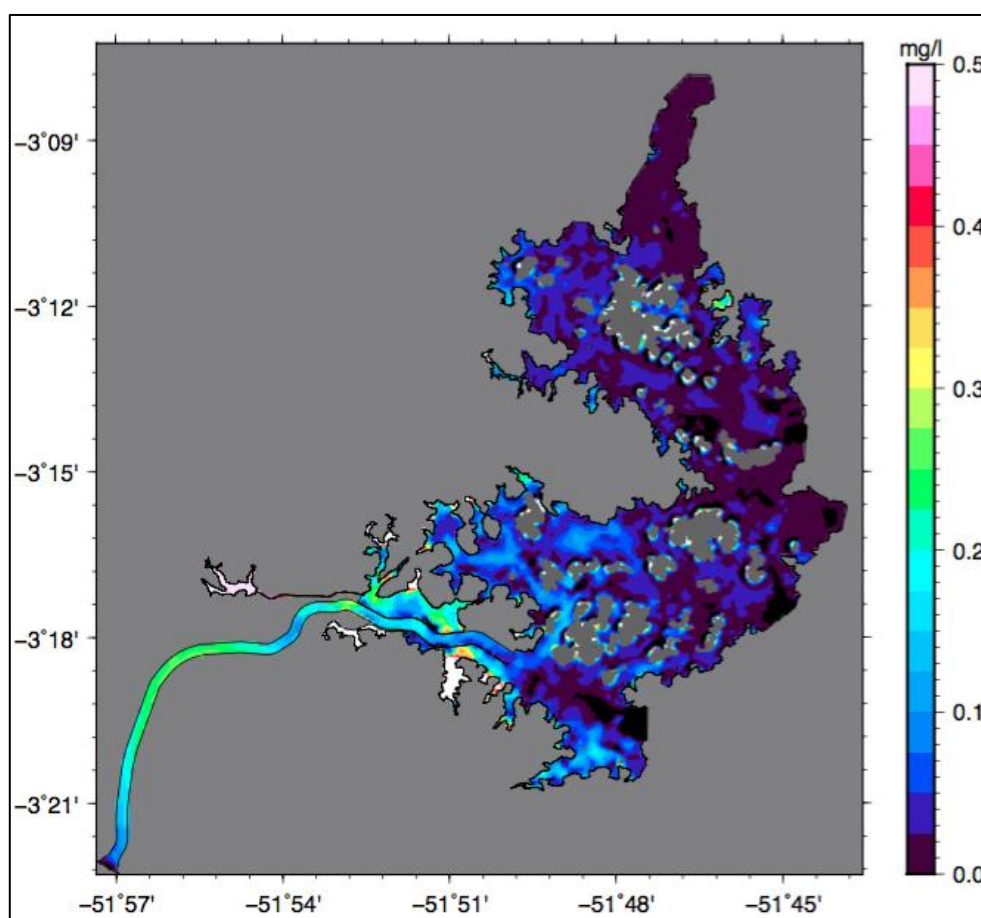
**Figura 175: Campo superficial de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

#### 5.4.8. *Oxigênio Dissolvido – Análise Temporal*

Nos resultados das simulações do modelo hidrodinâmico, seção 5.2, foram observadas diferenças de temperaturas da ordem de 3°C (entre camada superficial e de fundo) ao longo do Canal de Derivação. Com base nesse fato foram realizadas análises da evolução temporal da temperatura e das velocidades ao longo da coluna da água. Essas análises foram feitas para tentar entender se ocorrem processos de estratificação importantes no RI, em função das características da circulação hidrodinâmica gerada para cada um dos cenários. Esse fato se torna importante quando estratificações térmicas geram duas ou mais camadas que impedem trocas verticais, podendo prejudicar a qualidade das águas das camadas inferiores.

Nesse sentido o mesmo tipo de análise foi efetuada para a concentração de OD. Isso foi feito para tentar identificar se ocorre redução oxigênio nas camadas inferiores do RI, o que seria um indicativo de ocorrência estratificação. Essa verificação foi realizada

para três pontos de monitoramento - um ponto localizado na área do Canal de Derivação e outros dois pontos, denominados Reservatório 1 e Reservatório 2, localizados no interior do RI. A Figura 176 apresenta a distribuição espacial da diferença de concentração de OD entre duas camadas do RI, superfície e fundo, para o Cenário 6. Essa distribuição mostra que as maiores diferenças são observadas ao longo do Canal de Derivação, onde a diferença máxima é da ordem de 0,25 mg/L.



**Figura 176: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**

De uma forma geral, a comparação entre as distribuições espaciais das diferenças de concentração de OD entre a superfície e a camada de fundo, para todos os cenários, mostra que os maiores contrastes ocorrem na região do Canal de Derivação. Esse fato já havia sido observado nas análises feitas com os campos de temperatura. Os cenários 5 e 6, que possuem os maiores fluxos afluentes, apresentam as menores diferenças de concentração entre as camadas. Já os cenários 1 a 4, com menores



vazões médias afluentes, apresentam diferenças de concentração variando entre 0,4 e 0,5 mg/L. Com base nisso, a análise do comportamento temporal da concentração de OD foi feita para os cenários 3, 5 e 6 nos três pontos de interesse mencionados anteriormente. A Figura 177 apresenta a evolução temporal de OD obtida para o Cenário 6 no ponto de monitoramento localizado no Canal de Derivação. É possível notar que no período em que ocorre a operação por pulsos, entre os dias 30 e 210, não se observam diferenças significativas entre as concentrações superficiais e de fundo. Para os pontos localizados no interior do reservatório, ponto R1 (Figura 178) e R2 (Figura 179), a análise da evolução temporal mostra pouca diferença nas concentrações entre superfície e fundo, reforçando a evidência de que o reservatório não apresenta indicativos de estratificação em relação ao OD.

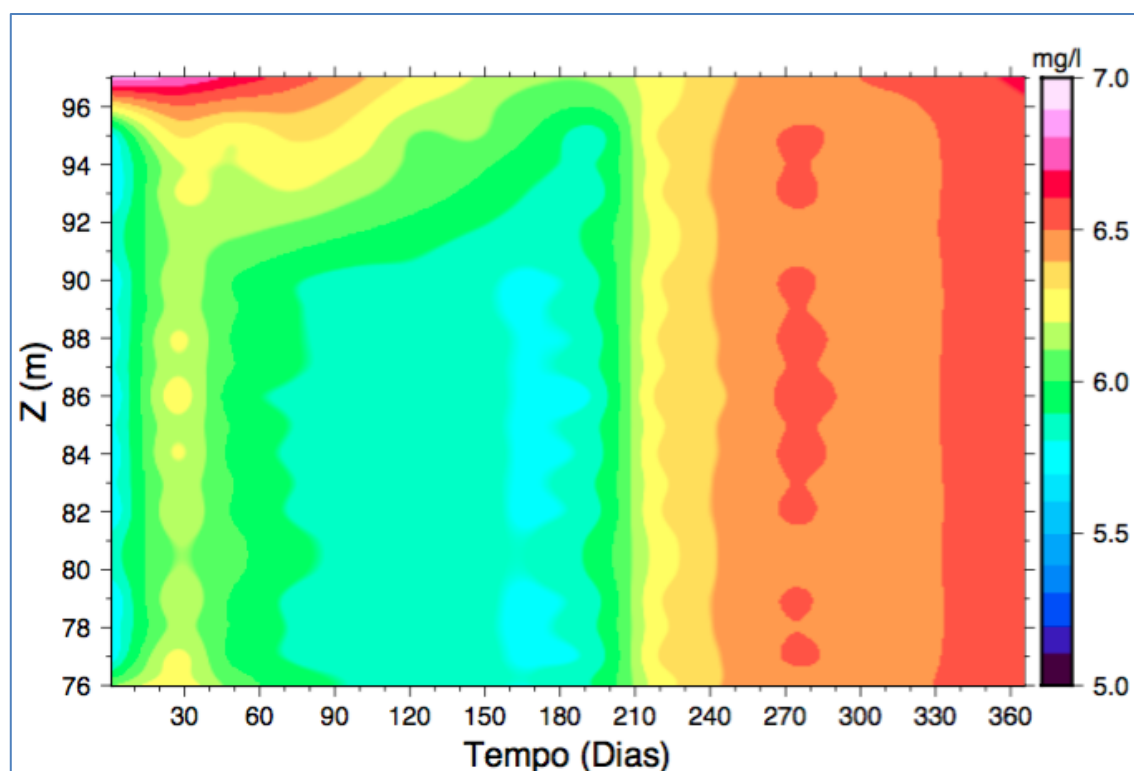


Figura 177: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 6.

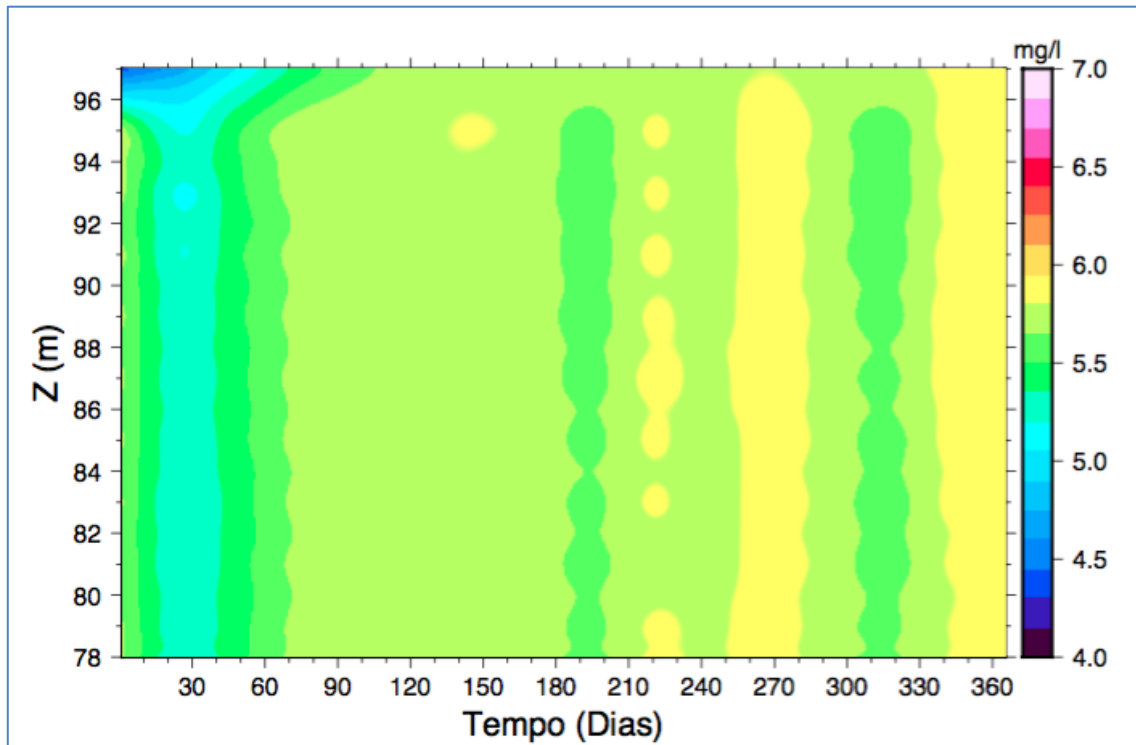


Figura 178: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 6.

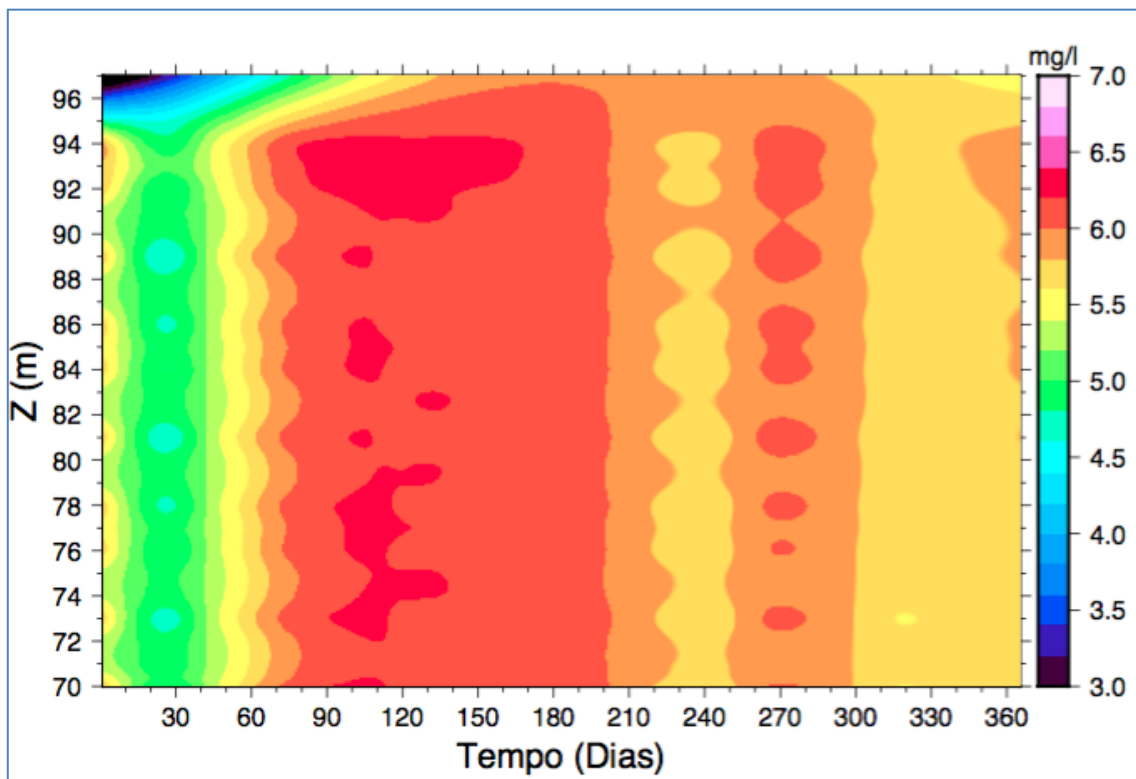
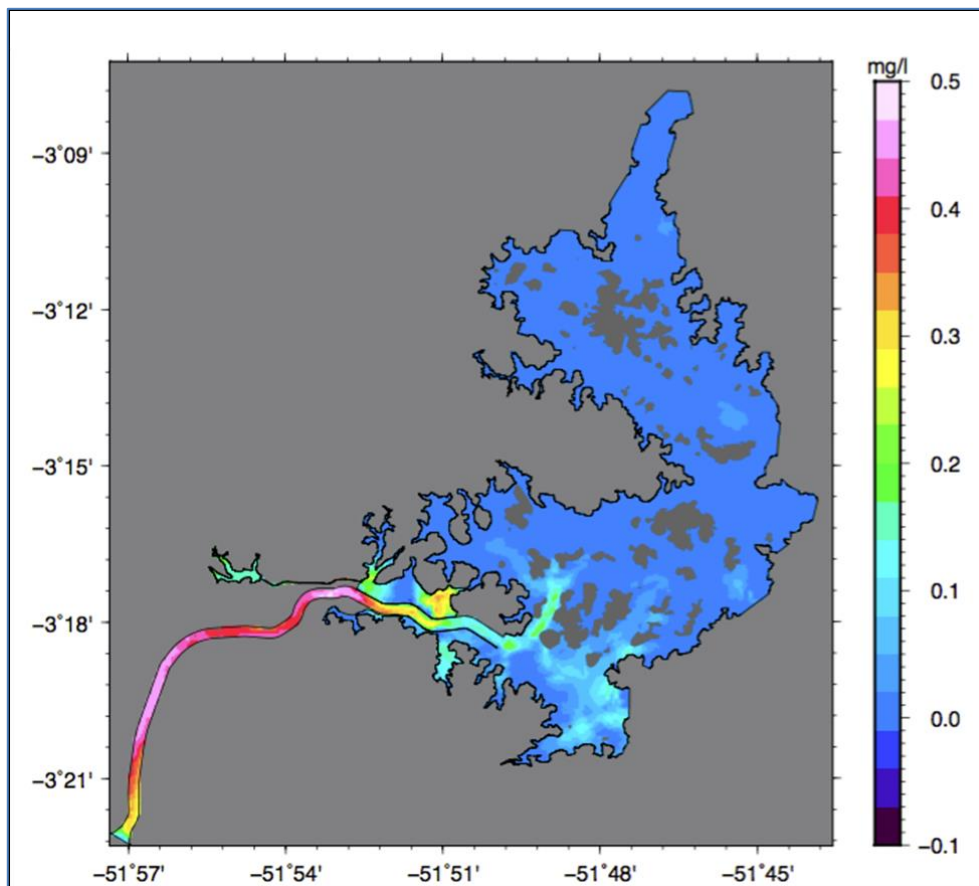


Figura 179: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 6.

A Figura 180 apresenta a distribuição espacial das diferenças de concentração de OD entre a superfície e o fundo para o Cenário 2. Como comentado anteriormente, as maiores diferenças são encontradas na região do Canal de Derivação e apresentam valores da ordem de 0,5 mg/L. A Figura 181, a Figura 182 e a Figura 183 apresentam a evolução temporal das concentrações de OD respectivamente nos pontos Canal de Derivação, R1 e R2. Conforme mencionado, no ponto Canal de Derivação a circulação é dominada pelo fluxo de entrada oriundo do Reservatório Xingu, já os pontos R1 e R2 se encontram fora do domínio desse fluxo de descarga. Em todos os três pontos de monitoramento a concentração de OD não apresentou variações significativas entre as camadas verticais, e permaneceu sempre acima de 6,0 mg/L.



**Figura 180: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**

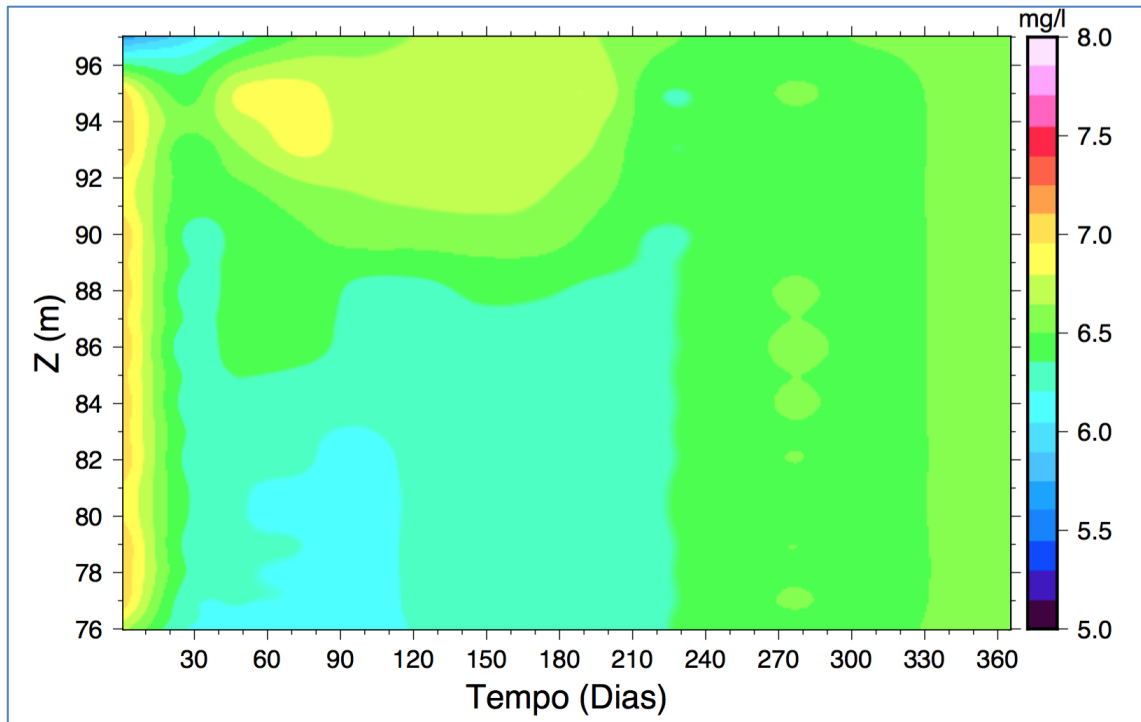


Figura 181: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 2.

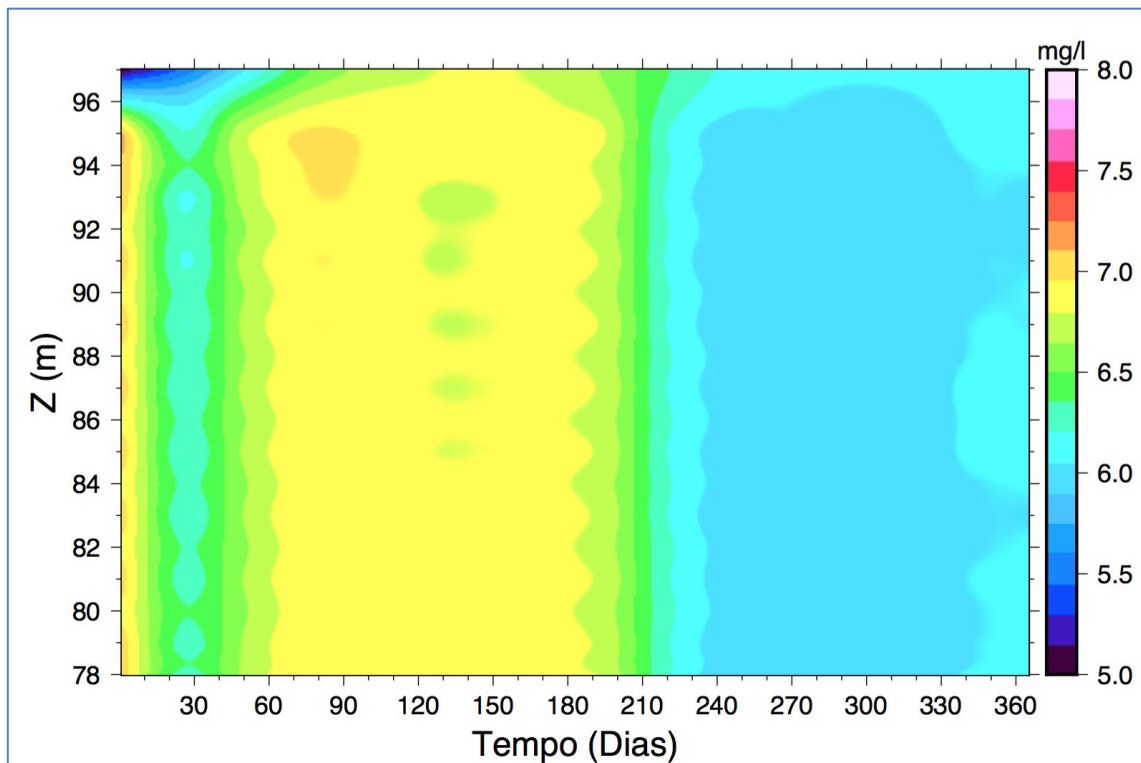
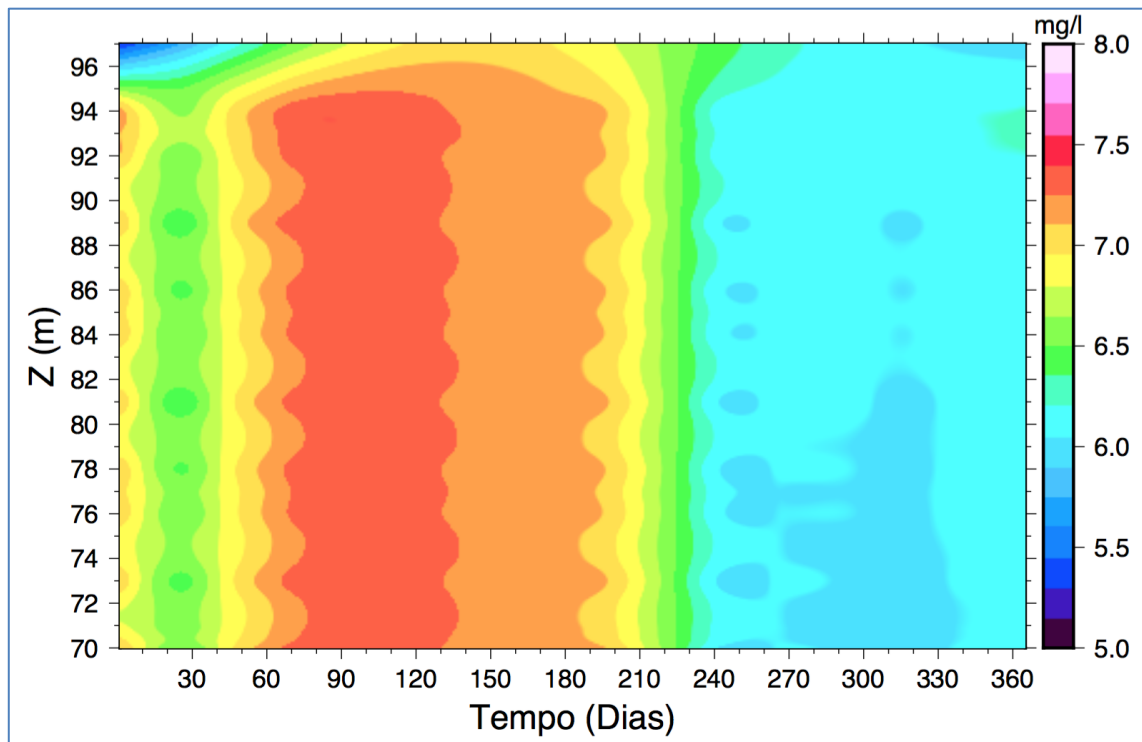
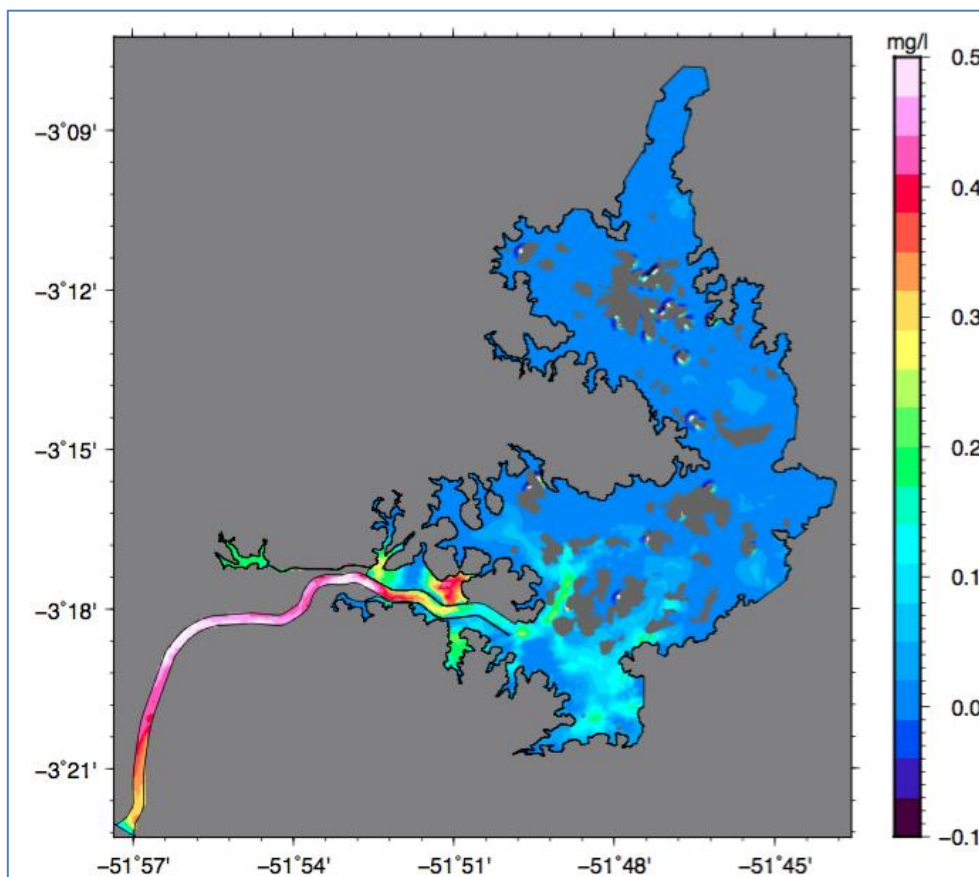


Figura 182: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 2.



**Figura 183: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 2.**

A Figura 184 apresenta a distribuição espacial das diferenças de concentração de OD entre superfície e fundo para o Cenário 3. O comportamento dessa distribuição é análogo ao obtido para o Cenário 2, descrito acima. Ou seja, as maiores diferenças se concentram na região do Canal de Derivação com valores da ordem de 0,5 mg/L. A Figura 185, a Figura 186 e a Figura 187 apresentam a evolução temporal da concentração de OD para três pontos de monitoramento no Cenário 3. Para esse cenário o ponto localizado no Canal apresentou variação de concentração de OD da ordem de 0,65 mg/L no segundo mês (Julho) de simulação. Para o restante do período as diferenças entre a camada superficial e de fundo foram menos significativas, o que indica a completa ausência de estratificação ou decréscimo importante da concentração de OD nas camadas inferiores.



**Figura 184: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**

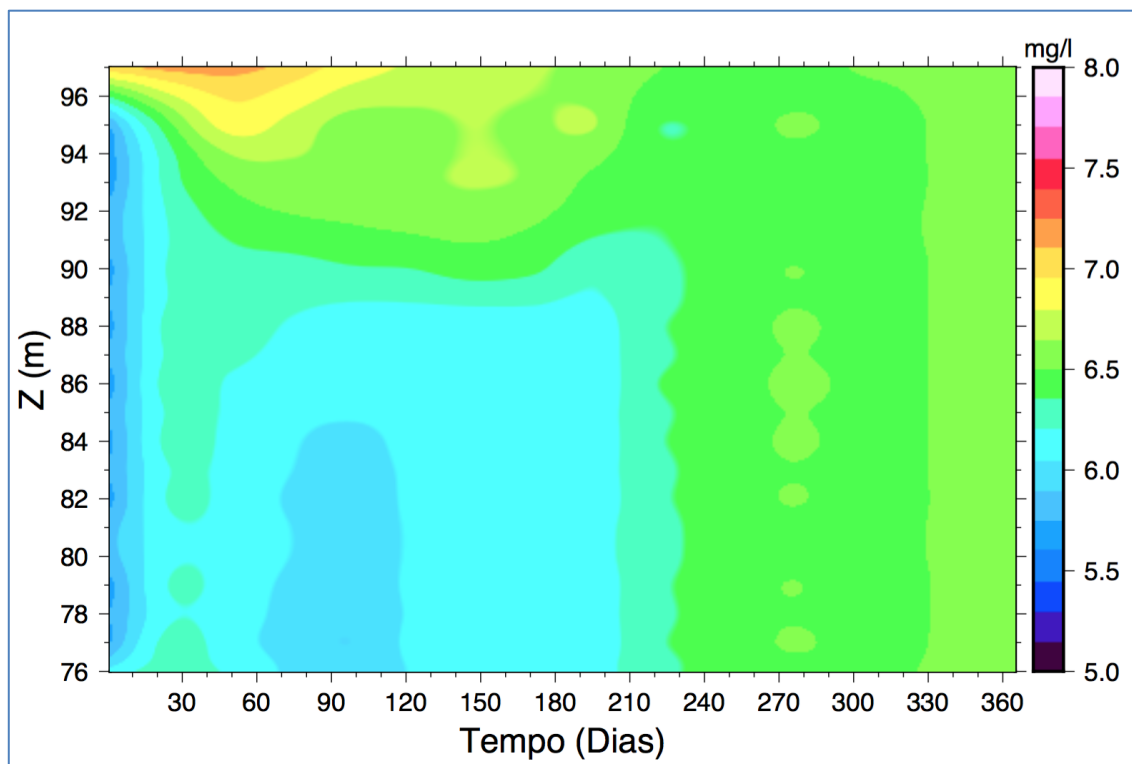


Figura 185: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 3

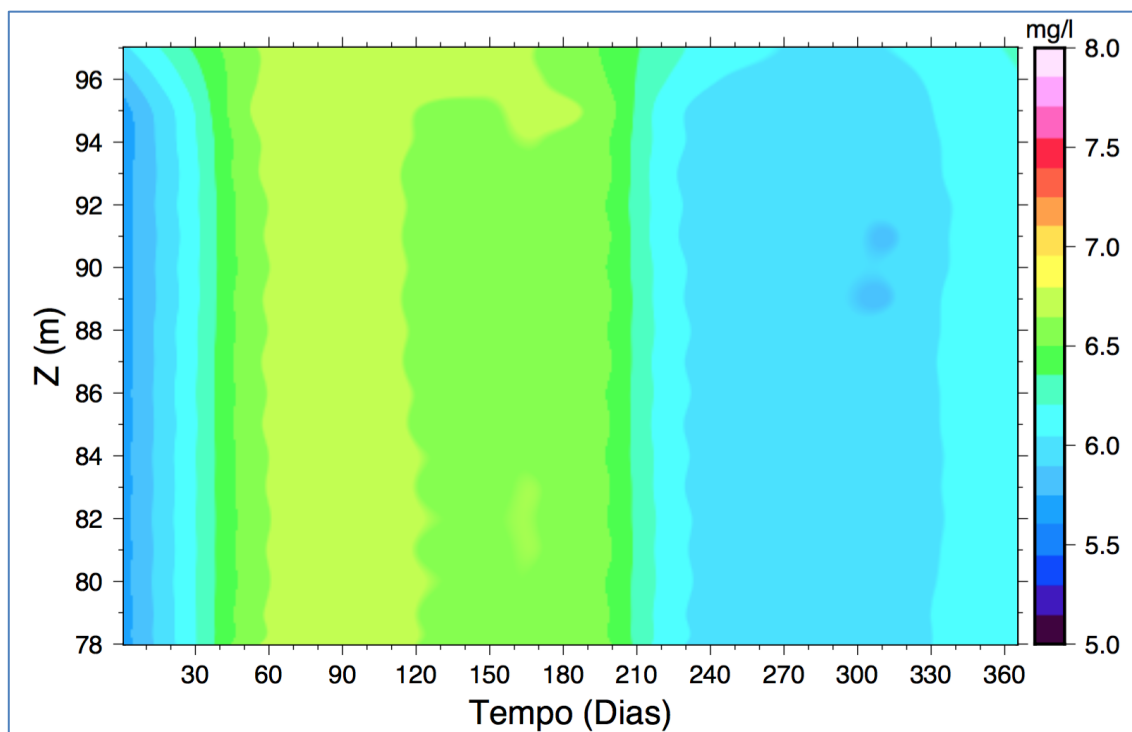
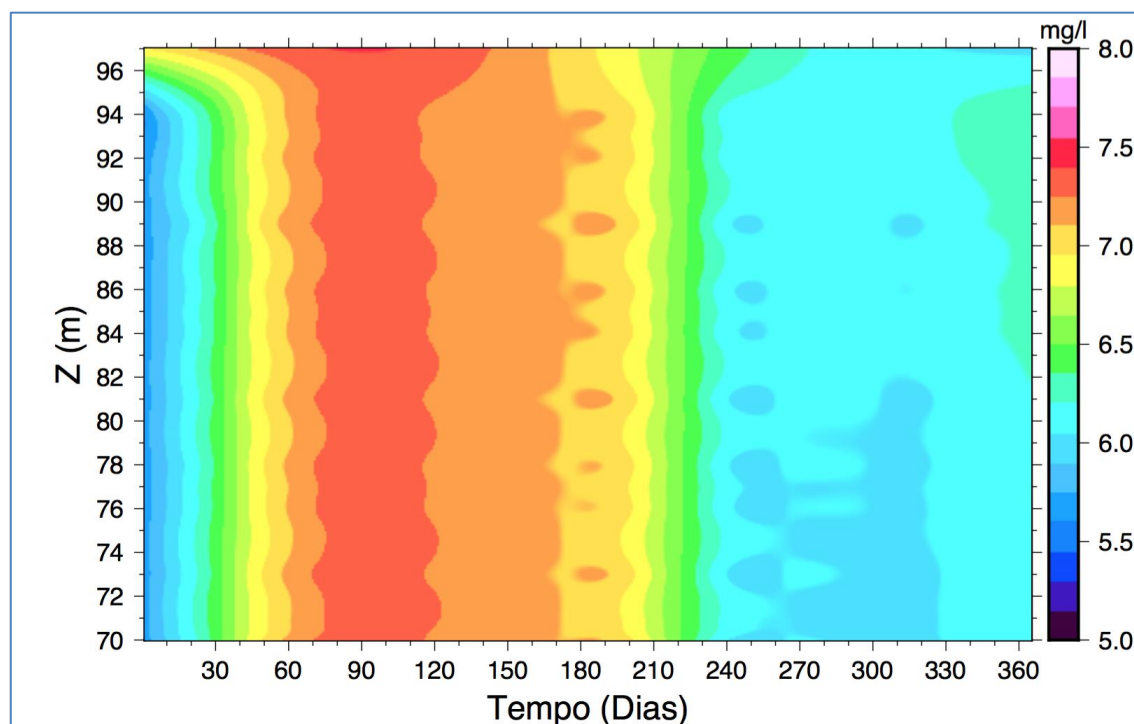


Figura 186: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 3.



**Figura 187: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 3.**

A Figura 188 apresenta a distribuição espacial das diferenças de concentração de OD entre superfície e fundo para o Cenário 4, cujo comportamento é similar ao dos cenários 2 e 3. Os maiores contrastes entre as concentrações de superfície e de fundo aparecem na região do Canal e também são da ordem de 0,5 mg/L. Para este cenário, a Figura 189, a Figura 190 e a Figura 191 apresentam a evolução temporal da concentração de OD para os pontos Canal de Derivação, R1 e R2. Novamente o comportamento é similar aos descritos anteriormente.



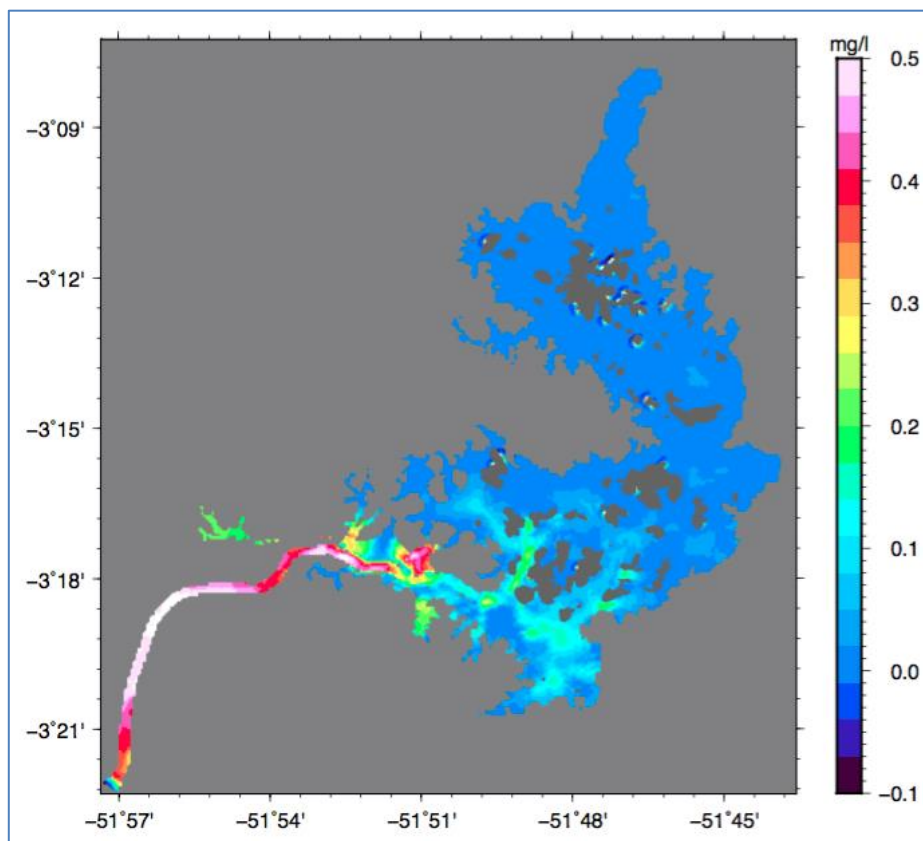


Figura 188: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.

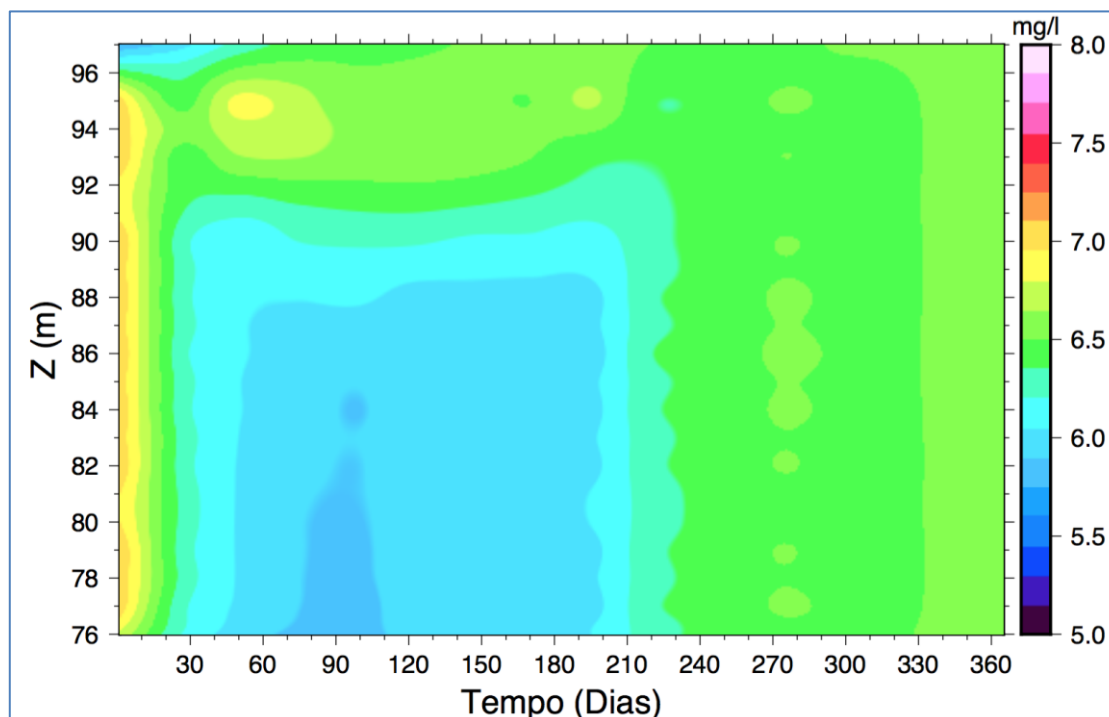


Figura 189: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 4.

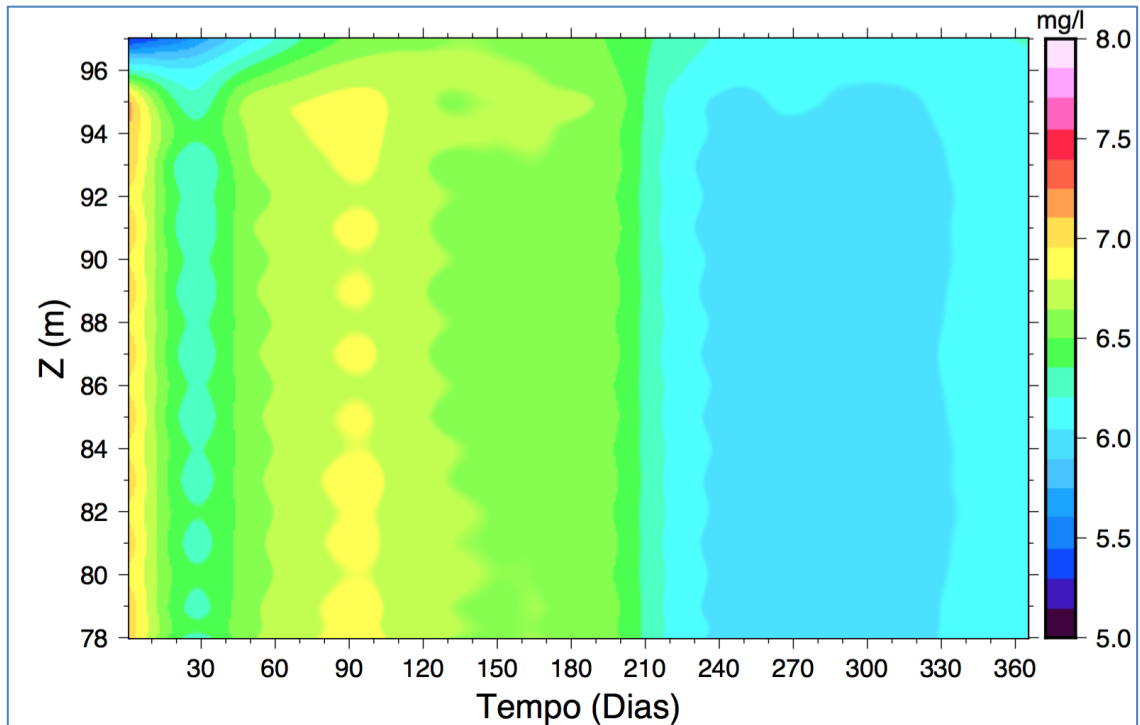


Figura 190: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 4.

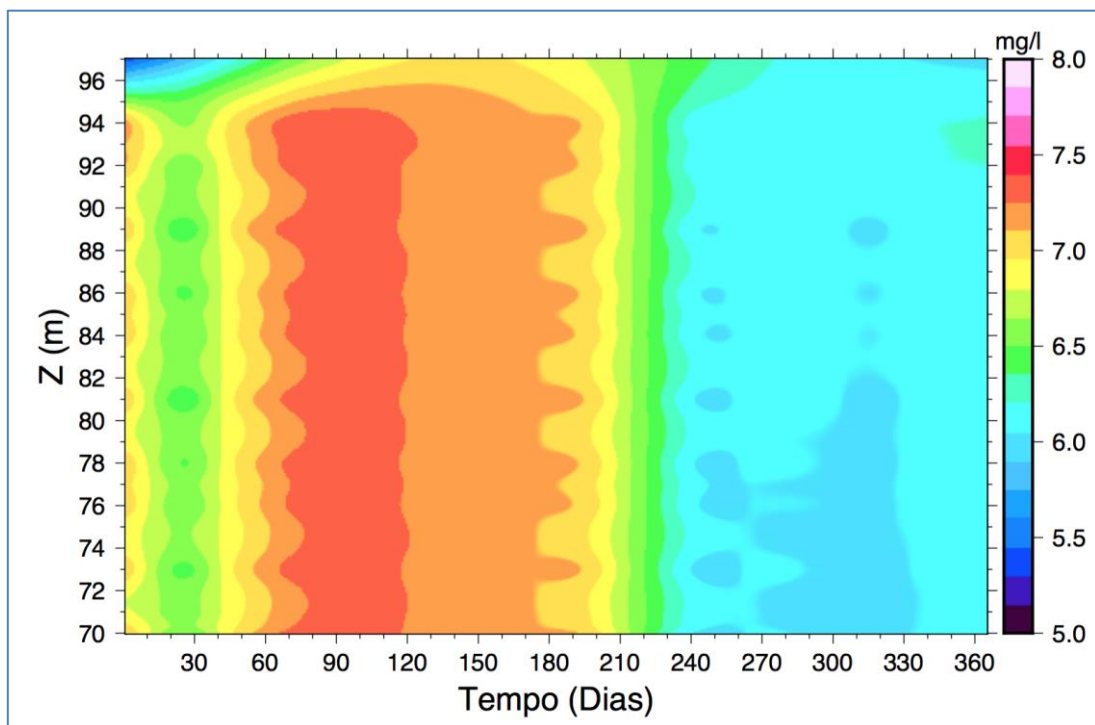
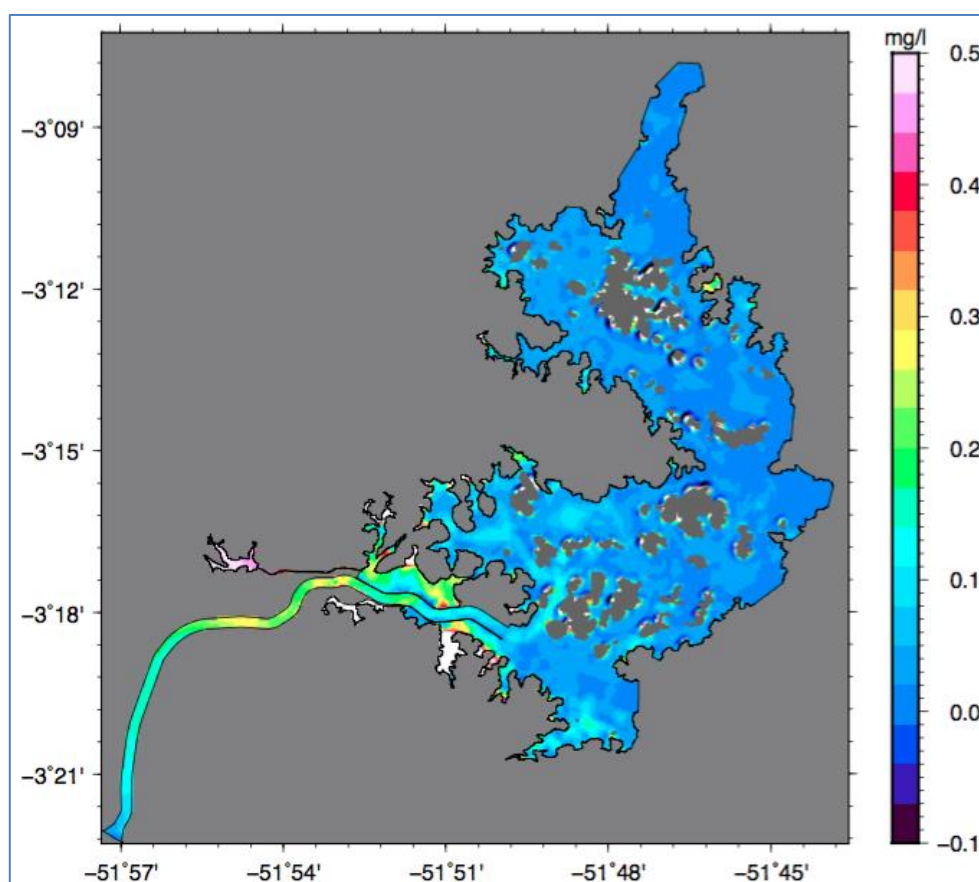


Figura 191: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 4.

A Figura 192 apresenta o resultado obtido com as condições definidas para o Cenário 5. A distribuição da diferença de concentração de OD entre as camadas é muito

semelhante ao resultado obtido para o Cenário 6. Ou seja, as diferenças máximas ocorrem na região do canal variam entre 0,2 e 0,3 mg/L. Nos pontos de monitoramento temporal localizado no Canal de Derivação (Figura 193), e para os pontos localizados no reservatório, ou seja, no ponto R1 (Figura 194) e no ponto R2 (Figura 195), as variações são muito pequenas e análogas às observadas no Cenário 6, que apresenta características hidrodinâmicas semelhantes.



**Figura 192: Diferença de concentração de OD entre a superfície e o fundo no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**

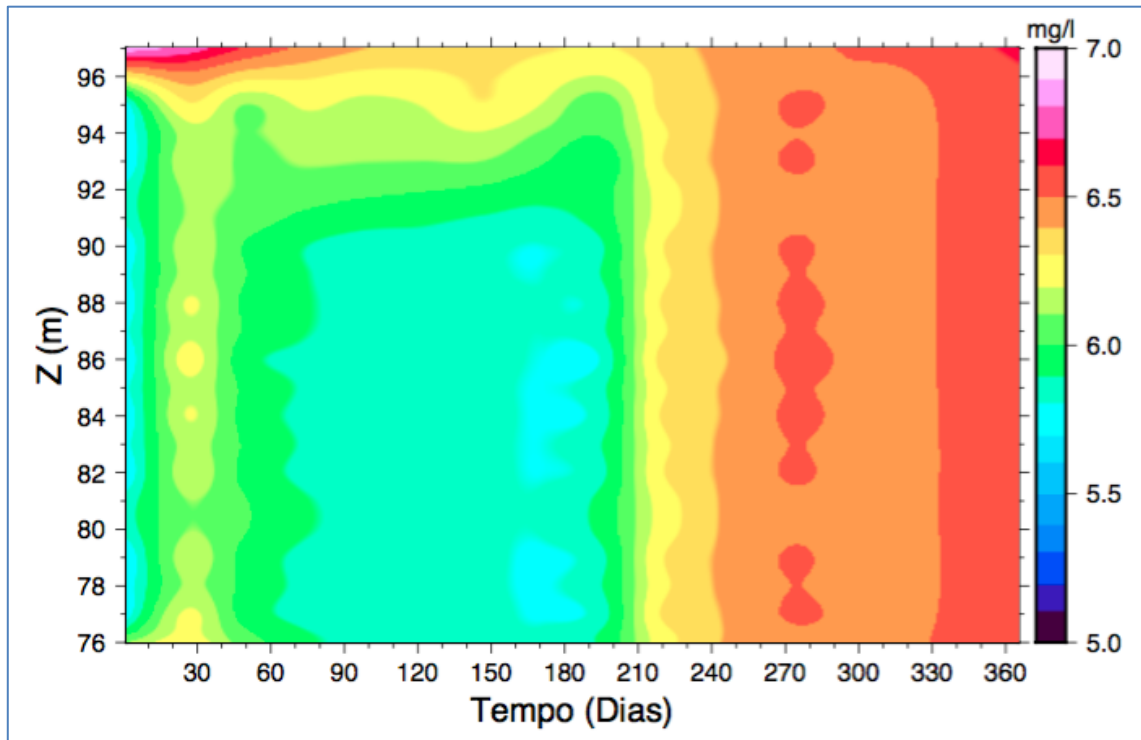


Figura 193: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 5.

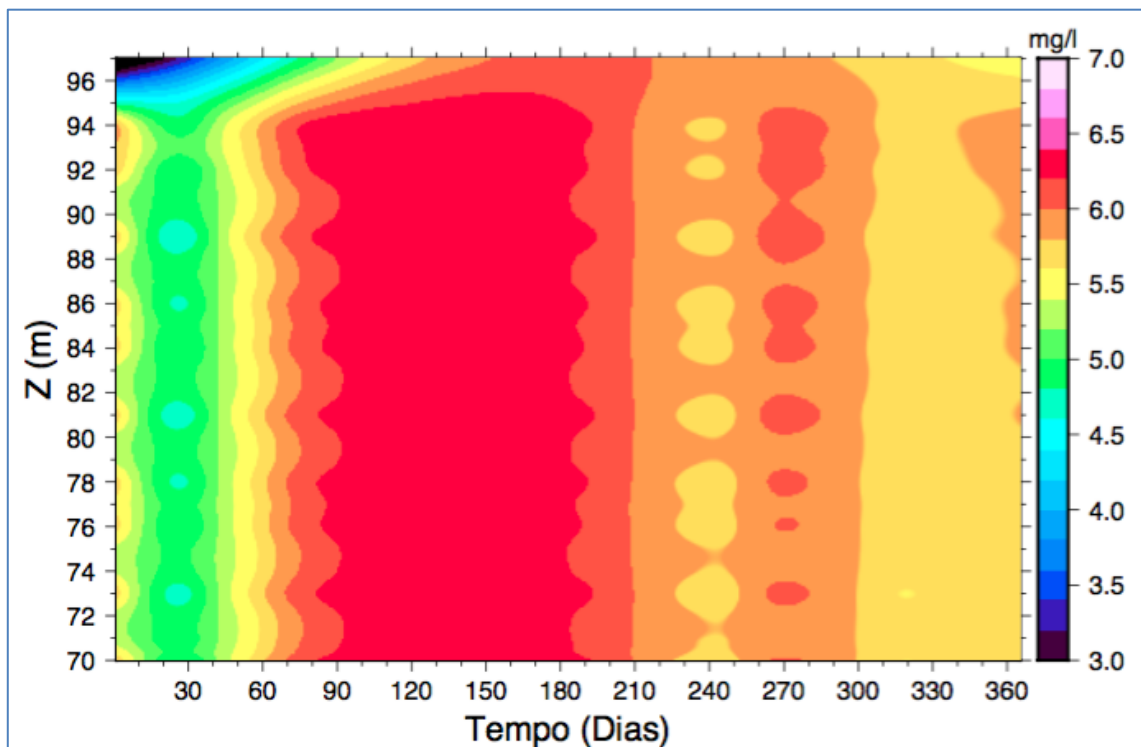


Figura 194: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 5.

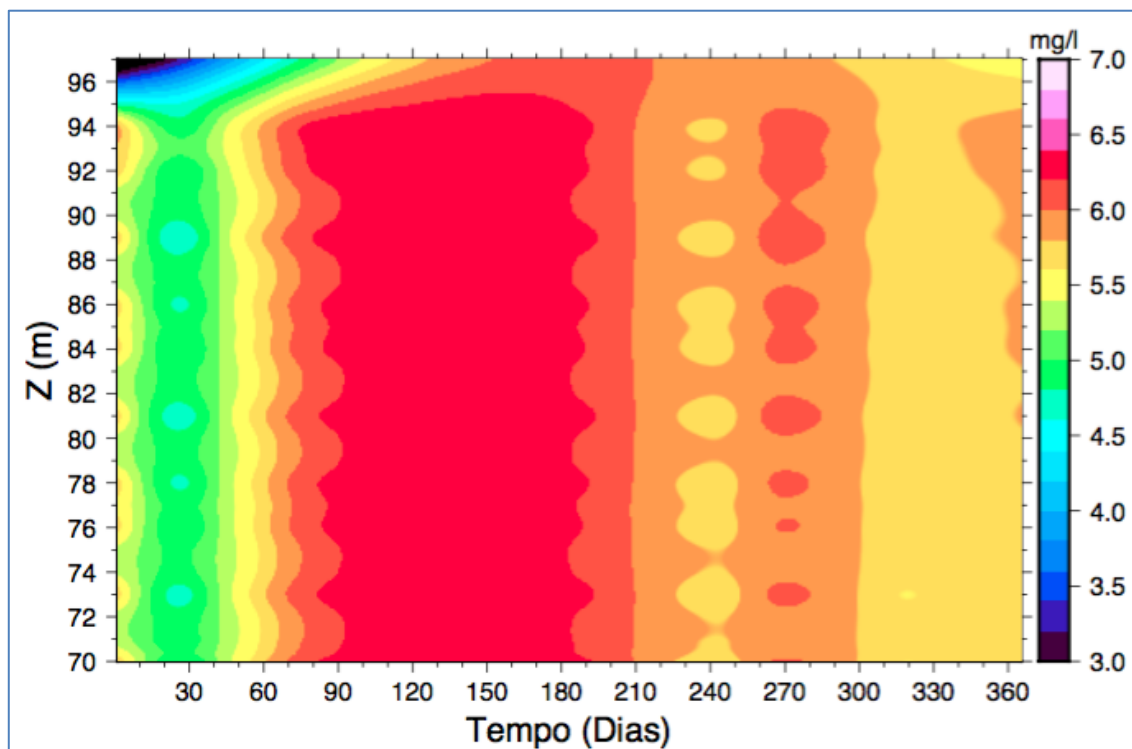


Figura 195: Evolução temporal de OD ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 5.

#### 5.4.9. *Nitrogênio Amoniacal, Nitrato e Fósforo Total – Análise Temporal*

Como mencionado anteriormente, a análise temporal para todo o período de simulação foi feita para verificação de possível degradação da qualidade de água no RI em função da estratificação.

Para exaurir todas as possibilidades de ocorrência de possíveis níveis de parâmetros de qualidade da água fora da resolução, foi feita a análise da evolução temporal das concentrações de Nitrato, Amônia e Fósforo Total, para o Cenário 6, nos três pontos de monitoramento: Canal de Derivação, R1 e R2. Da mesma forma que para o OD, observa-se uma maior variação dos parâmetros no Canal de Derivação e uma maior uniformidade nos pontos localizados no interior do RI; isso se deve aos fluxos mais intensos observados no Canal de Derivação. Os resultados para os três parâmetros nos três pontos considerados são apresentados na sequência (Figura 196 até Figura 204). As observações mais importantes que podem ser extraídas dessa sequência de figuras são: (1) as concentrações são praticamente uniformes nas camadas verticais do corpo

hídrico, indicando a ausência de estratificação vertical, ou seja, as camadas são bem misturadas ao longo da coluna de água; (2) todas as concentrações se encontram dentro dos limites legais da Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de classe 2.

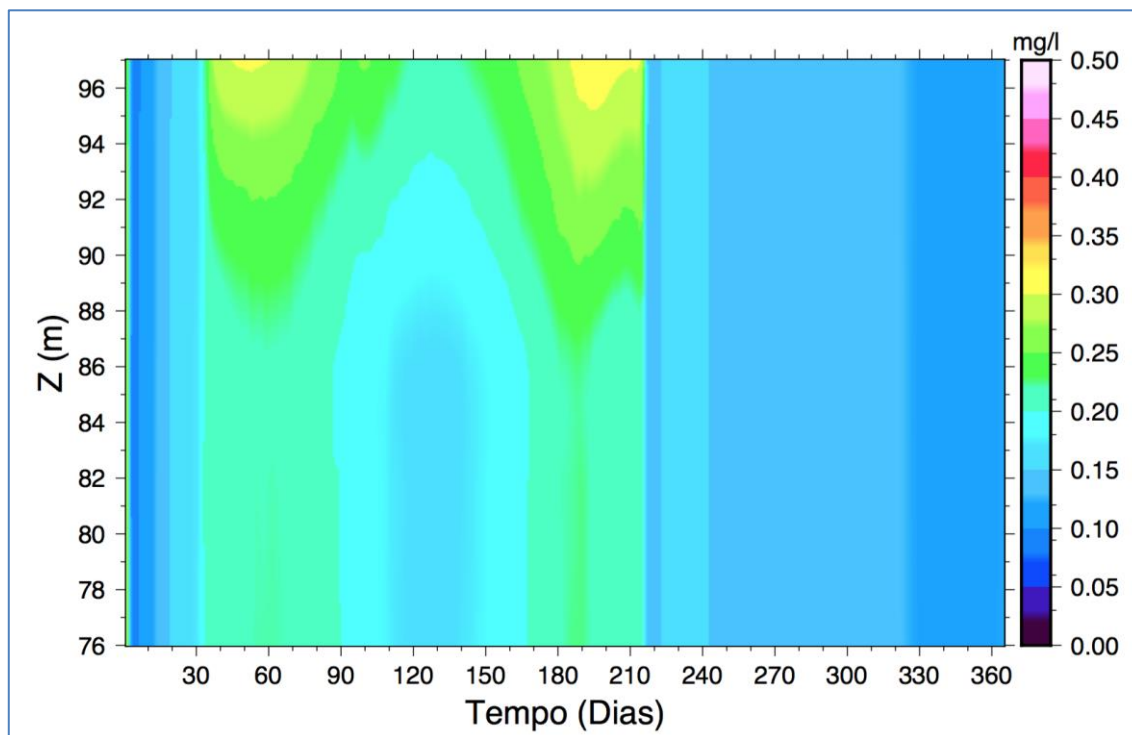


Figura 196: Evolução temporal de NO<sub>3</sub> ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 6.

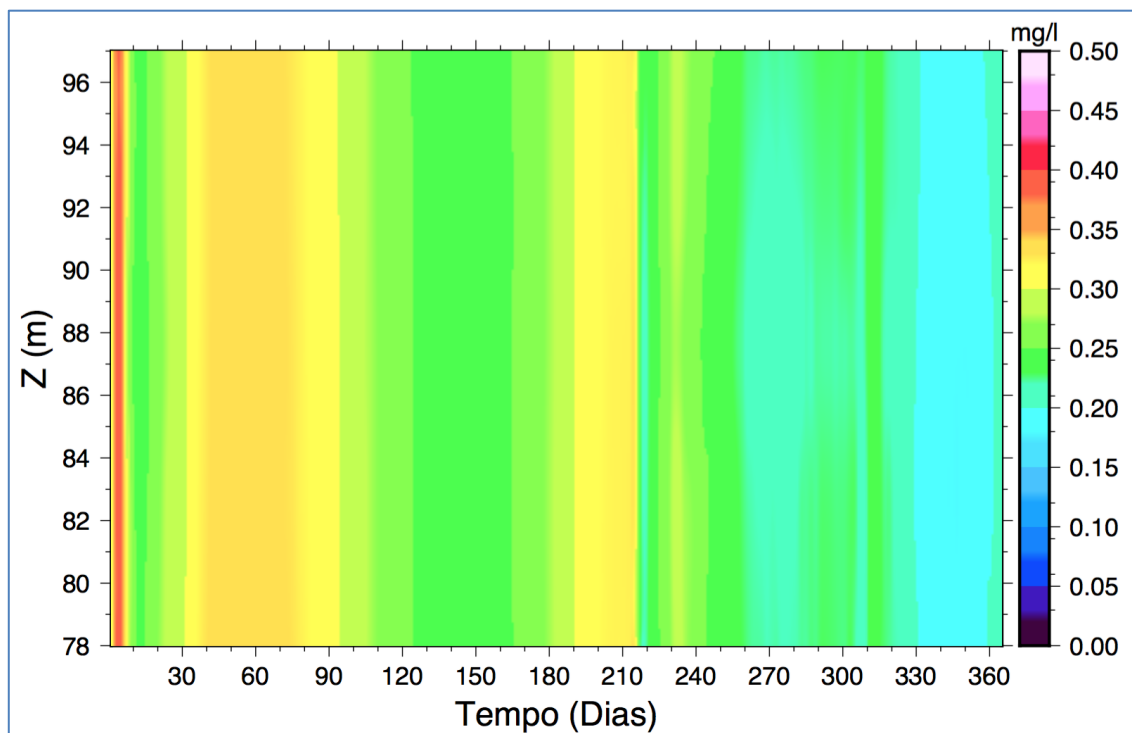


Figura 197: Evolução temporal de NO3 ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 6.

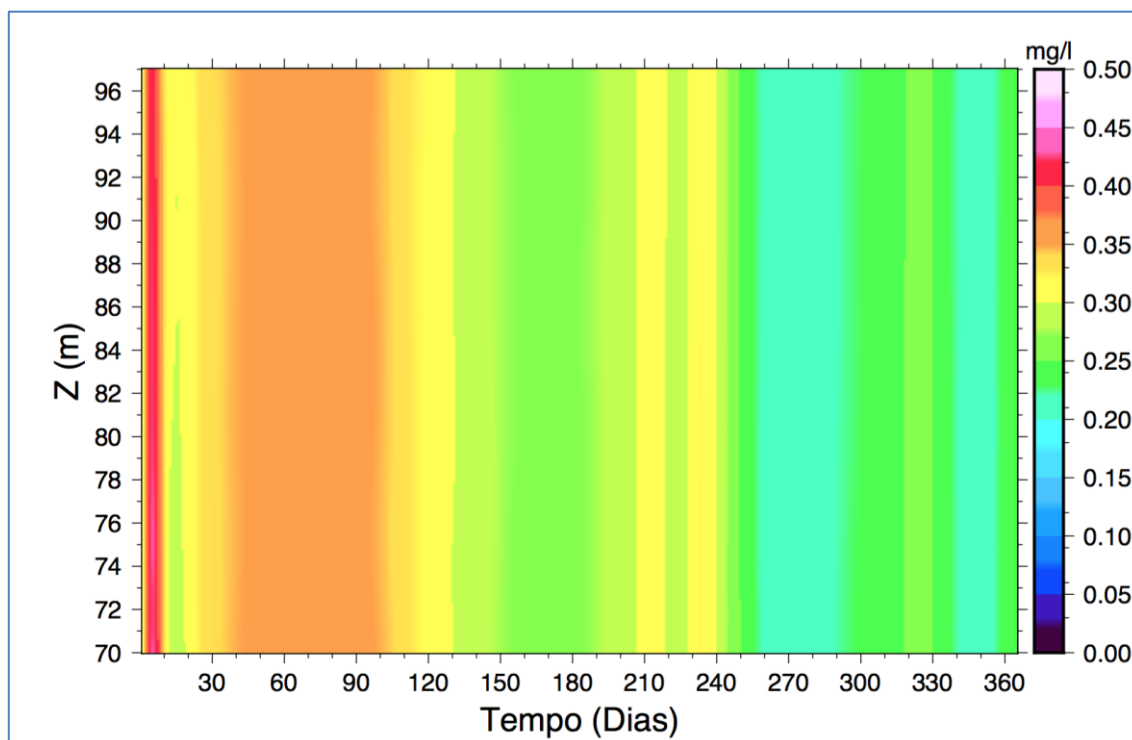


Figura 198: Evolução temporal de NO3 ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 6.

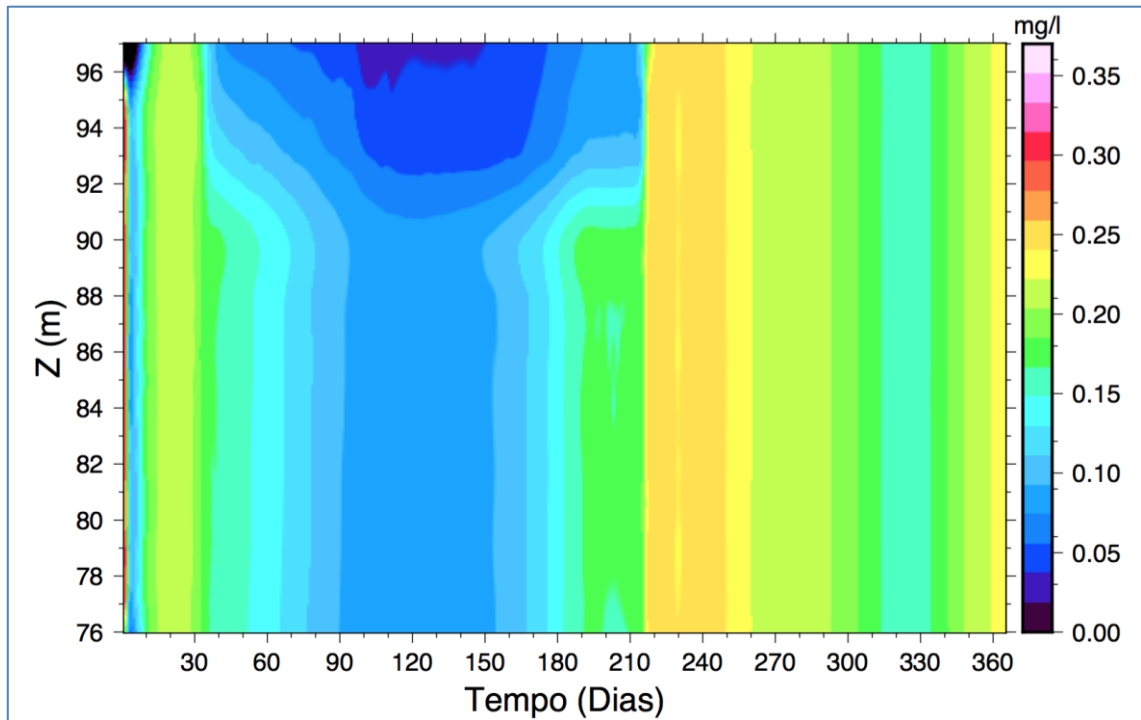


Figura 199: Evolução temporal de  $\text{NH}_4$  ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 6.

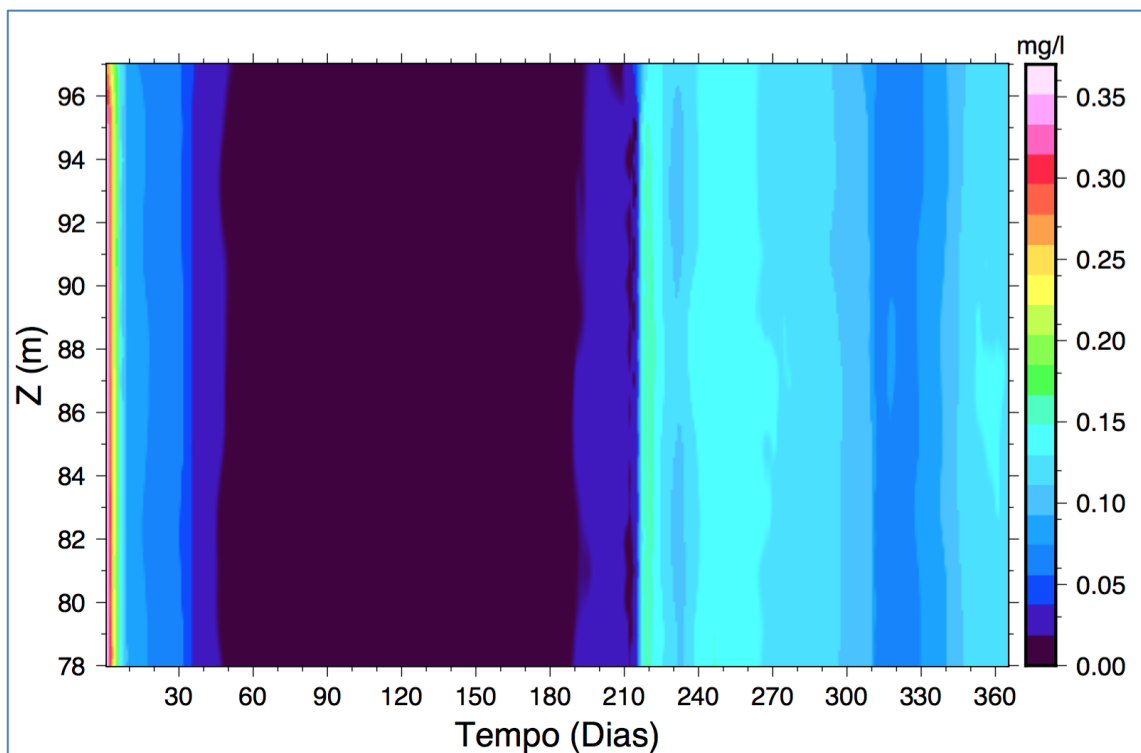


Figura 200: Evolução temporal de  $\text{NH}_4$  ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 6.



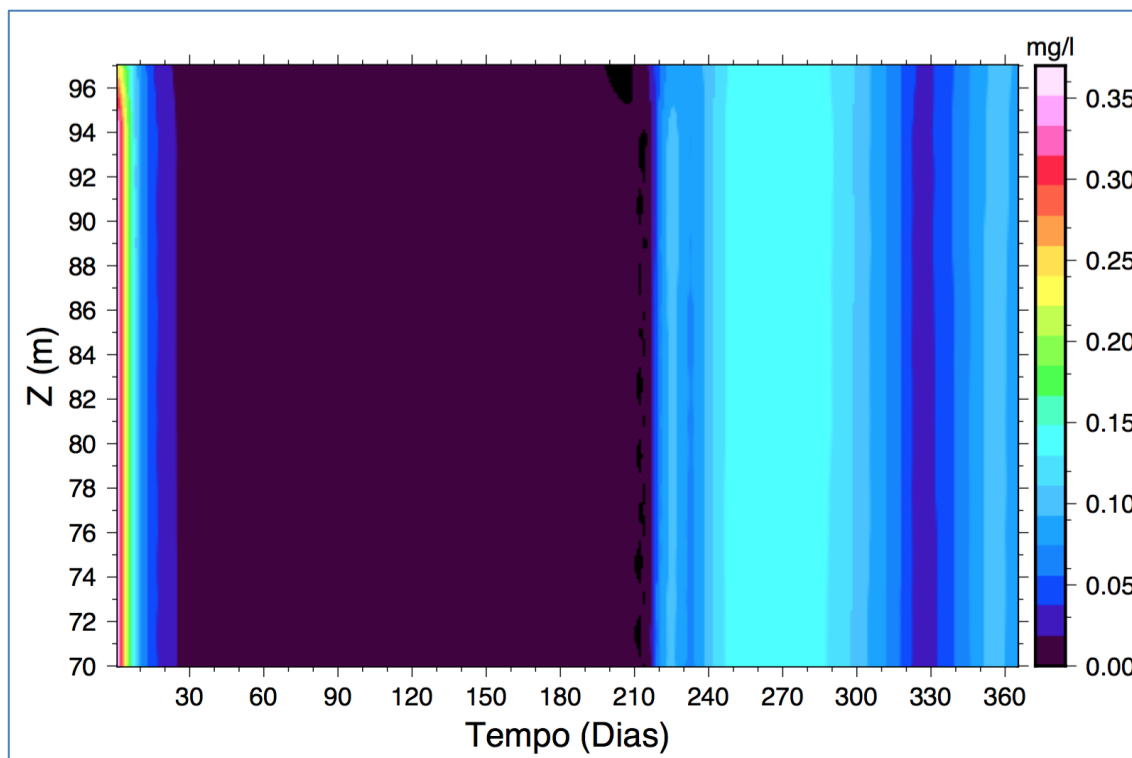


Figura 201: Evolução temporal de NH4 ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 6.

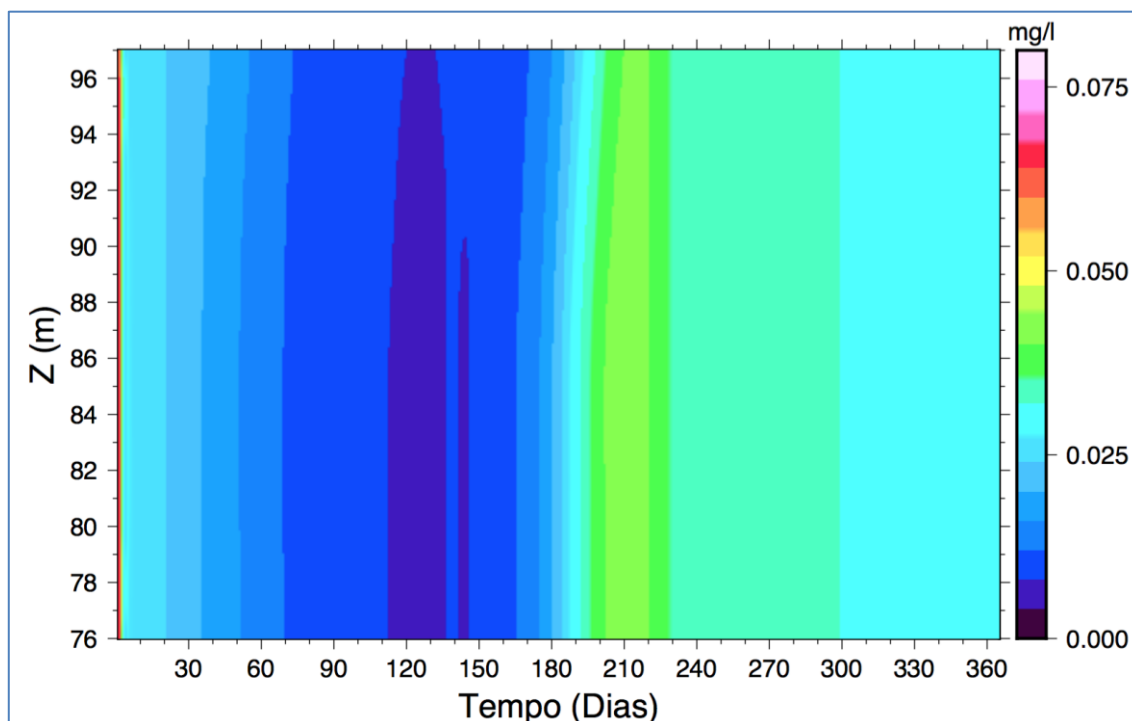


Figura 202: Evolução temporal de Fósforo Total ao longo da coluna de água (Canal) – Cenário 6.

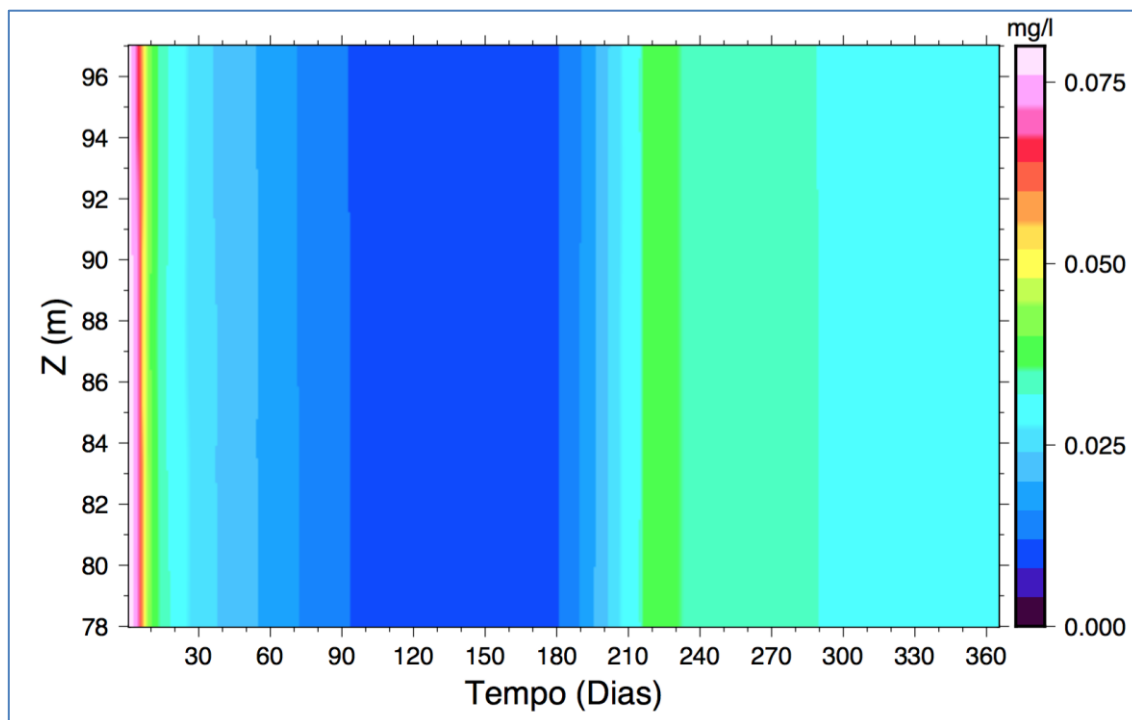


Figura 203: Evolução temporal de Fósforo Total ao longo da coluna de água (R1) – Cenário 6.

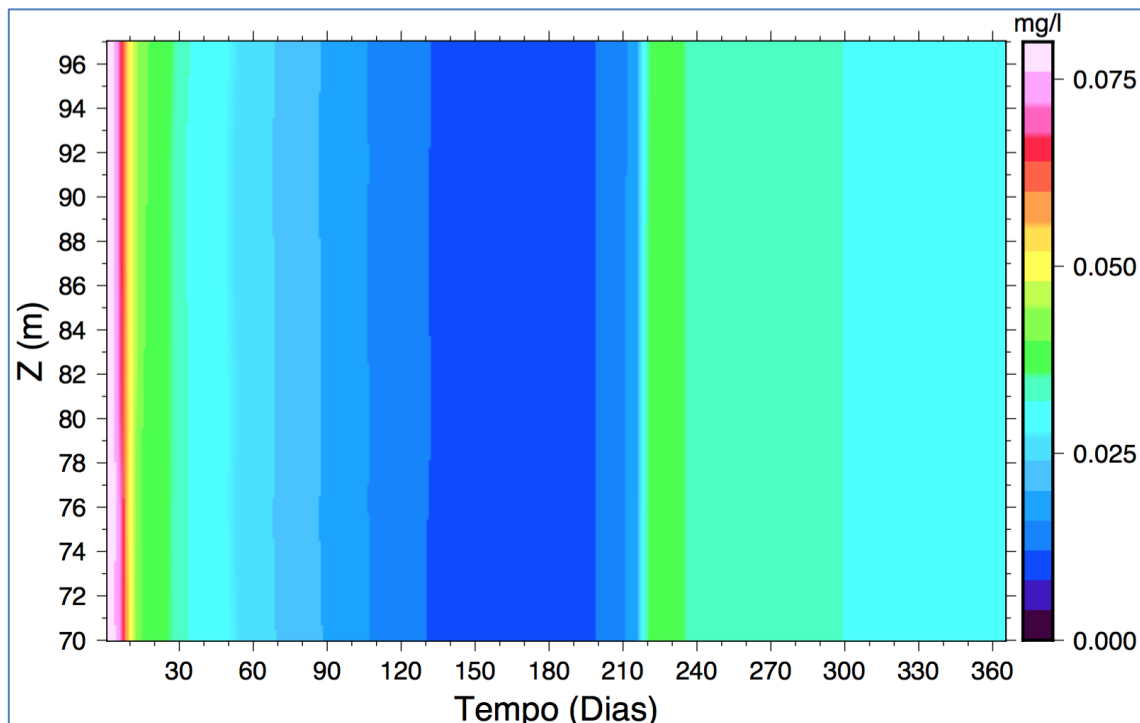


Figura 204: Evolução temporal de Fósforo Total ao longo da coluna de água (R2) – Cenário 6.

## 6. MODELAGENS MATEMÁTICAS DO TRECHO DE RESTITUIÇÃO DE VAZÃO (TRV)

O Trecho de Restituição de Vazão (TRV) está situado a jusante da Casa de Força Principal do empreendimento e do Trecho de Vazão Reduzida (TVR) – também conhecido como Volta Grande do Xingu. No início do TRV ocorre a junção das vazões de saída do Reservatório Intermediário (RI) e do TVR.

O TRV simulado compreende uma extensão de aproximadamente 30 km do rio Xingu, desde a Casa de Força Principal até a localidade de Vila Nova, a montante de Vitória do Xingu, no rio Xingu; é caracterizado por um regime fluvial típico e possui uma calha bem definida com variação longitudinal relativamente pequena.

Para o TRV foram realizadas simulações de hidrodinâmica e de qualidade da água para o mesmo período das simulações do Reservatório do Xingu e do Reservatório Intermediário. Estas simulações foram realizadas utilizando o sistema de modelos SisBaHiA<sup>®</sup>. As formas de implementação, bem como os resultados das simulações, são apresentadas nas próximas seções.

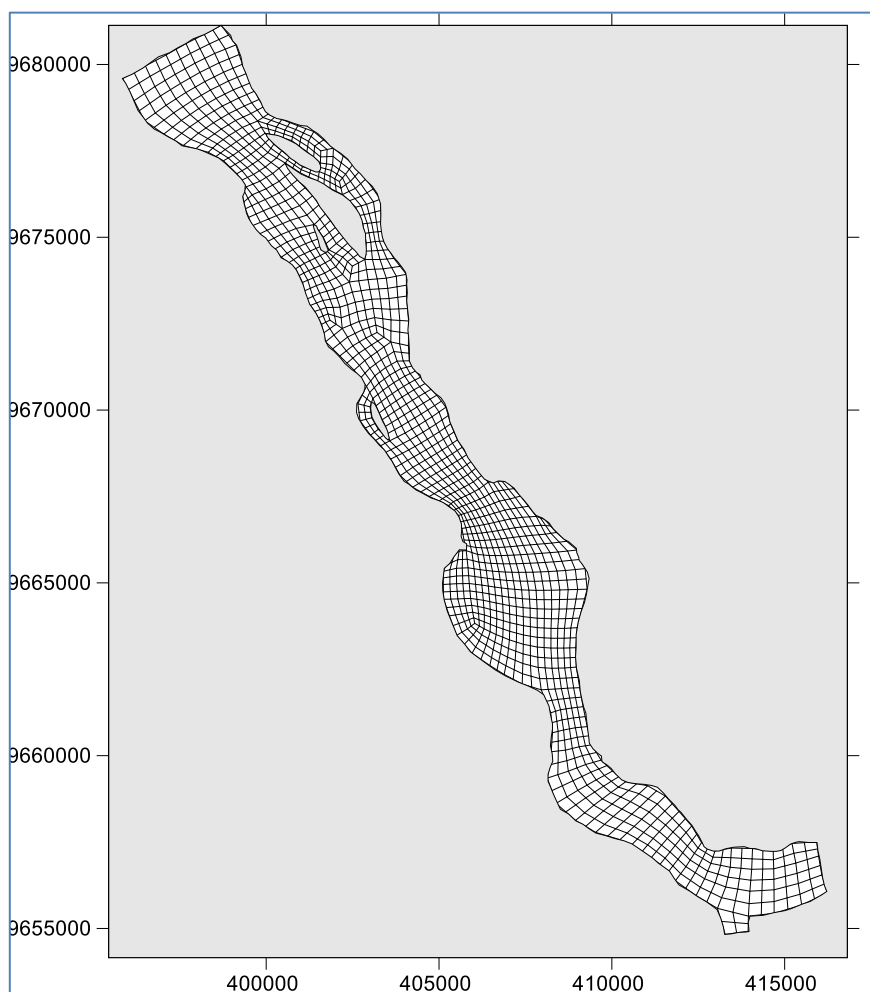
### 6.1. Implementação das simulações da hidrodinâmica

Considerando os dados fornecidos pela Norte Energia, e os cenários definidos anteriormente, a implementação das simulações de hidrodinâmica passaram pelas seguintes etapas:

- Discretização do domínio: malha de elementos finitos a ser utilizada nas modelagens no SisBaHiA<sup>®</sup> (Figura 205). A malha a ser utilizada nos testes iniciais é composta por 314 elementos, totalizando 1423 nós;
- Para as simulações, uma informação fundamental é a batimetria do fundo do reservatório. Para o TRV, a batimetria, bem como sua forma de obtenção, foi apresentada na seção 3.1.3.
- Definição das condições de contorno – ou seja, vazões de entrada e saída do domínio a ser modelado – de acordo com cada cenário de simulação conforme apresentado na seção 3.2. Como vazões afluentes foram utilizadas aquelas efluentes do Trecho de Vazão Reduzida e turbinadas na

UHE Belo Monte (vazão de saída do RI), ou seja, QTVR e QRI, definidas para cada um dos cenários;

- Considerando os objetivos das simulações e as simulações realizadas para o RX e para o RI, estas se iniciam no dia 01 de junho, período em que as vazões começam a diminuir (conforme o Hidrograma B - Tabela 1);
- As simulações foram realizadas para um período de 12 meses, considerando as vazões do Rio Xingu medidas durante o ano de 2016;
- Foram realizadas simulações para os 7 cenários definidos na seção 1.3.



**Figura 205: Malha do Trecho de Restituição de Vazão.**

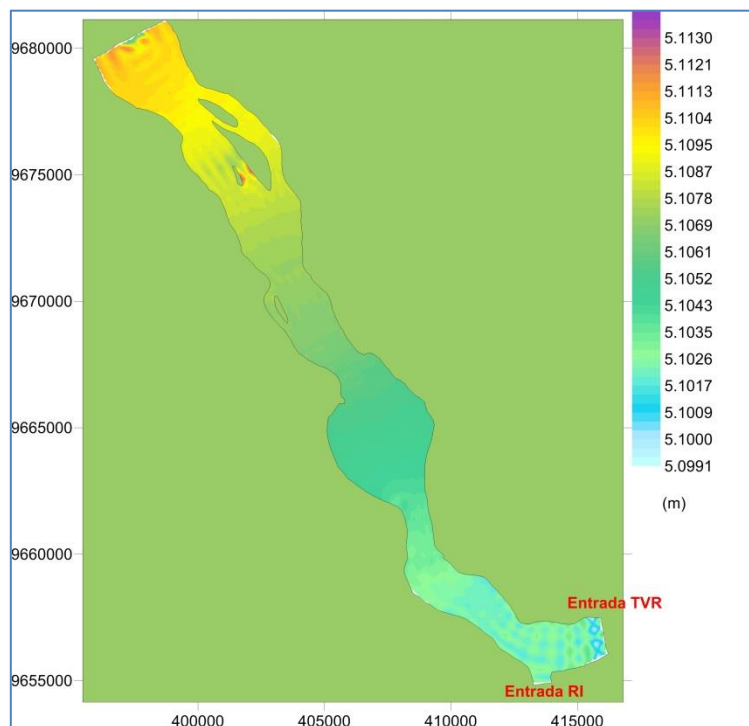
## 6.2. Resultados das simulações de hidrodinâmica

Conforme descrito anteriormente, foram simulados 7 cenários de hidrodinâmica considerando a operação das turbinas da UHE Belo Monte em pulsos durante o período de seca, ou seja, julho a dezembro. Todas as simulações foram realizadas para o período de 12 meses, com início em 01 de junho.

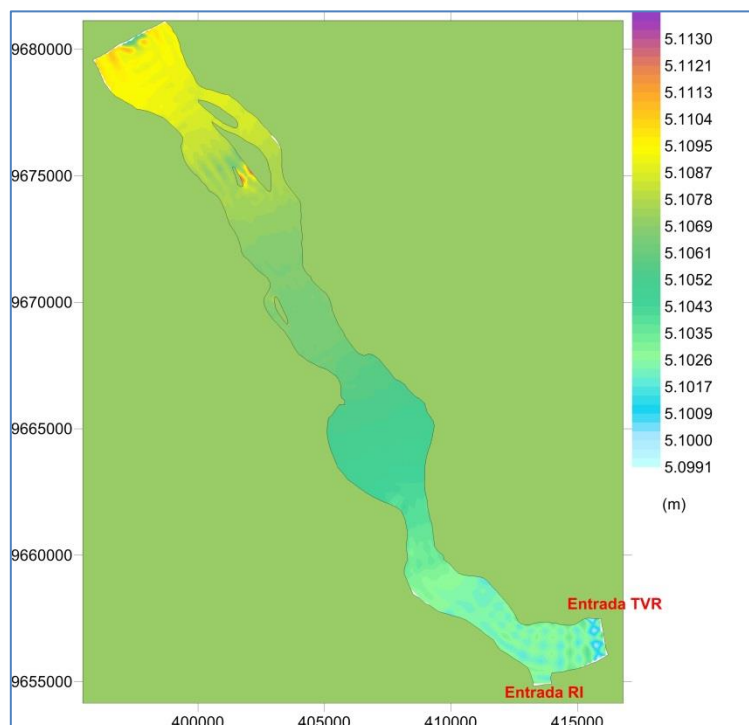
Dentre as possibilidades de resultados do SisBaHiA<sup>®</sup>, assim como foi feito para o Reservatório do Xingu (seção 4.2), são apresentadas as distribuições espaciais das velocidades de corrente e de elevações do nível d'água.

As elevações são apresentadas da Figura 206 até a Figura 212, e são semelhantes entre todos os cenários. Cabe lembrar que as diferenças entre os cenários estão nas vazões afluentes ao TRV. As diferenças de elevação entre o início e o fim do domínio modelado é de apenas cerca de 2,0 cm, sendo as menores na região de montante.

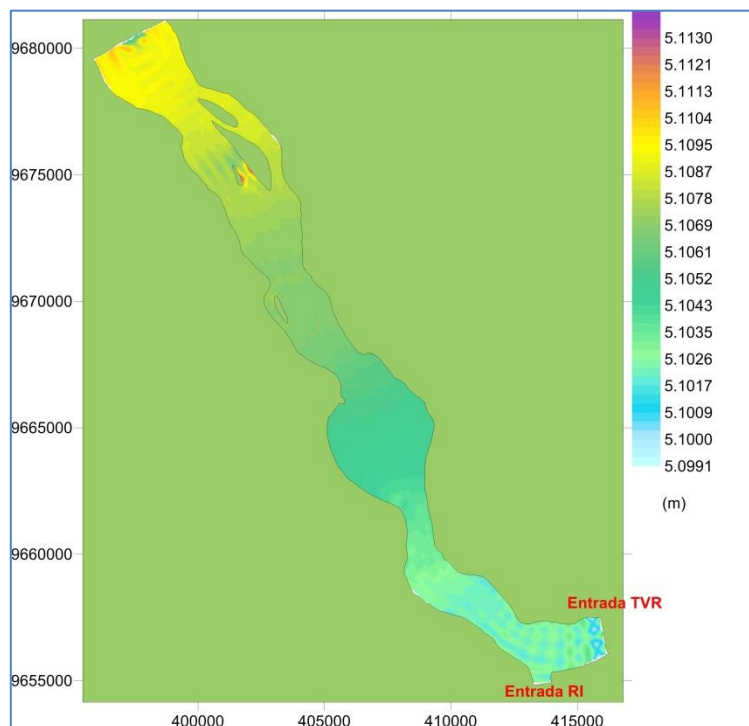
Da Figura 213 até a Figura 219 são apresentadas as distribuições espaciais de velocidade para o período de estiagem. Novamente os resultados são semelhantes para todos os cenários, e as velocidades observadas são sempre menores do que 0,01 m/s.



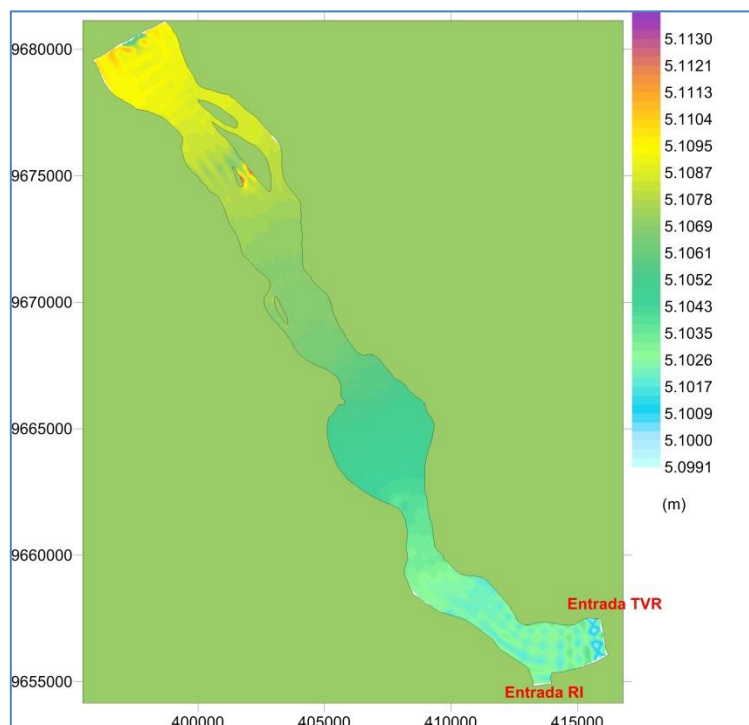
**Figura 206: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



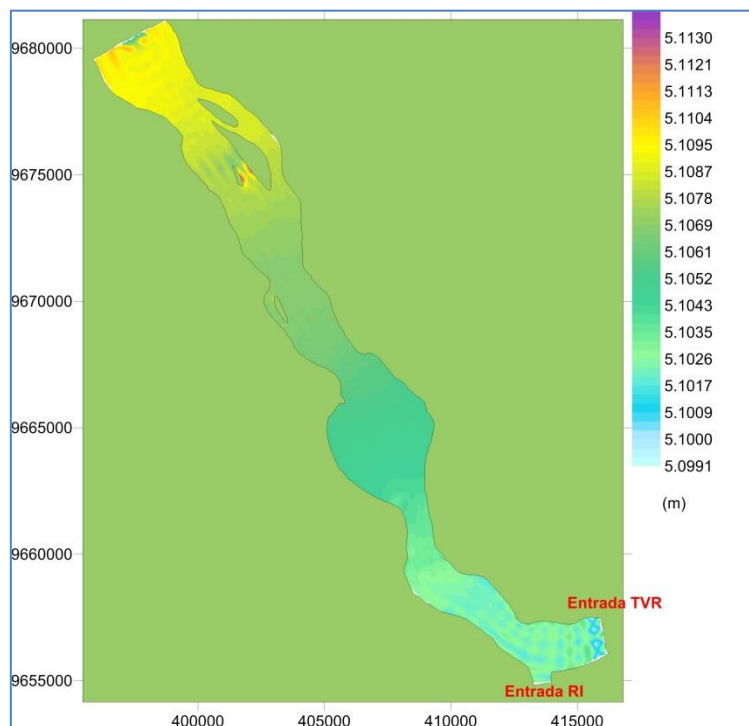
**Figura 207: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



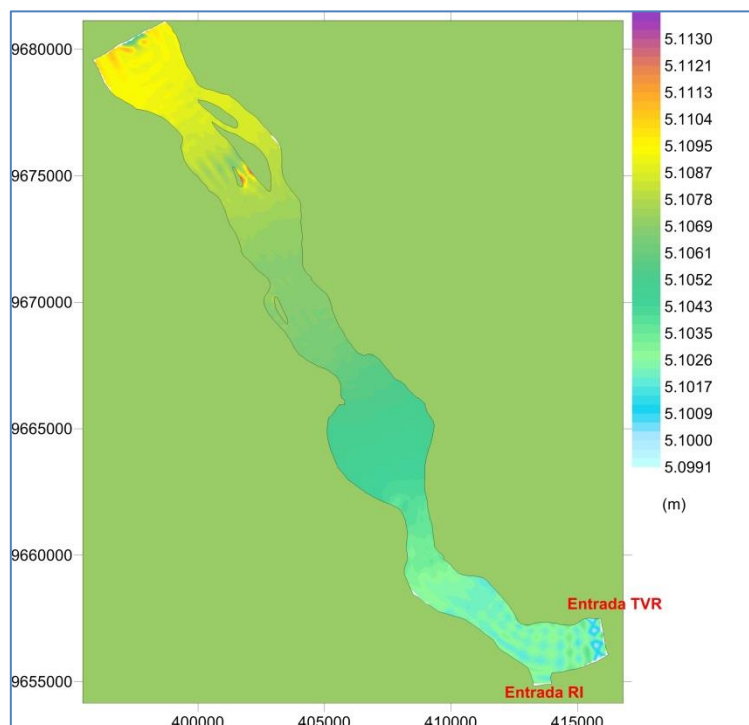
**Figura 208: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



**Figura 209: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 210: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 211: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



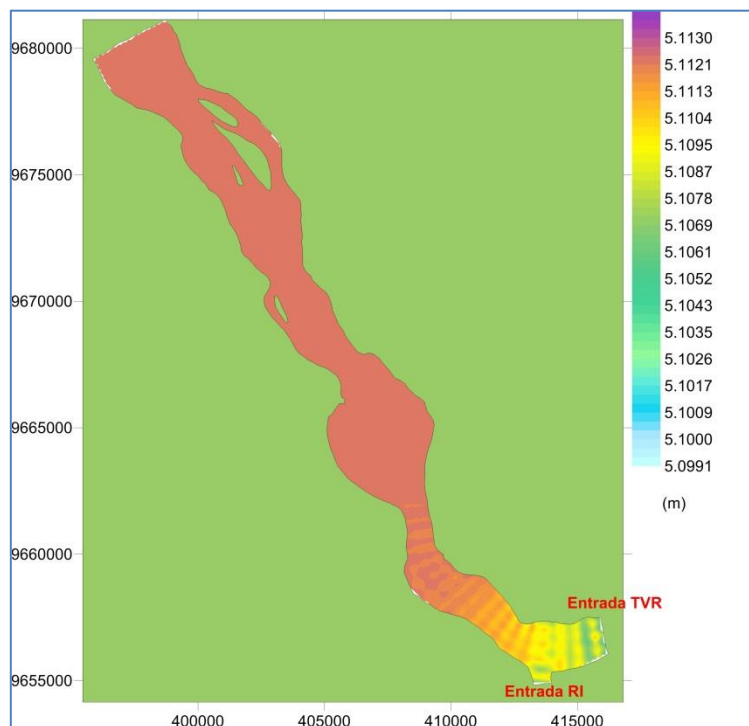


Figura 212: Distribuição espacial das elevações no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.

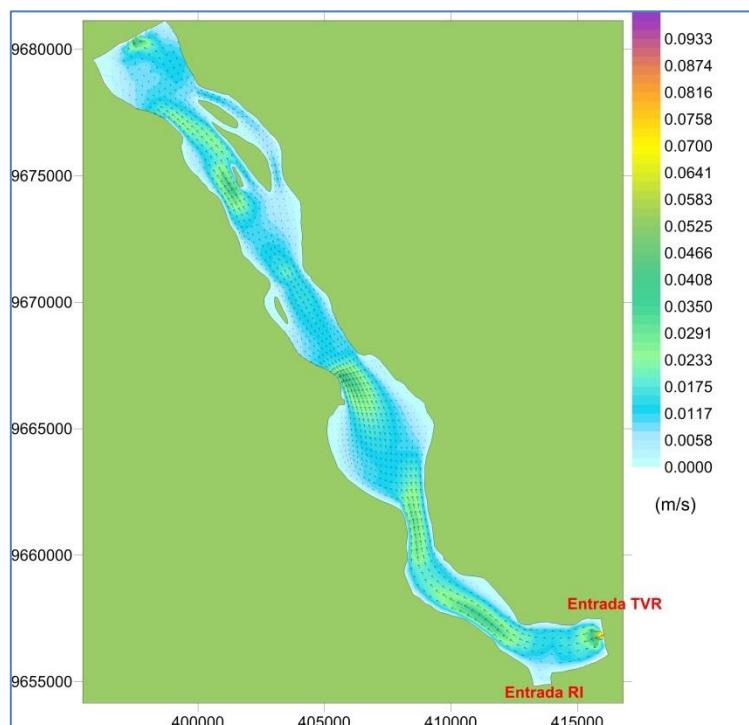


Figura 213: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.

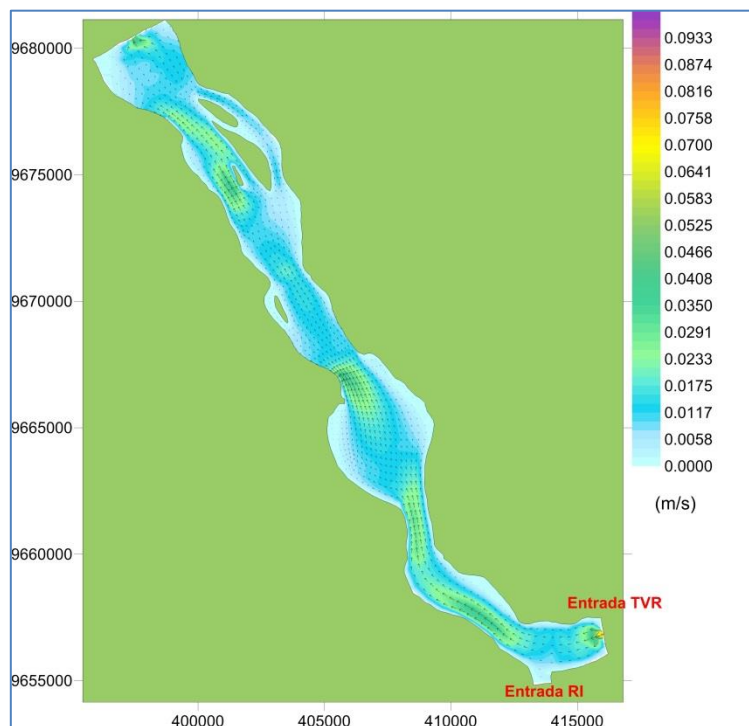


Figura 214: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.

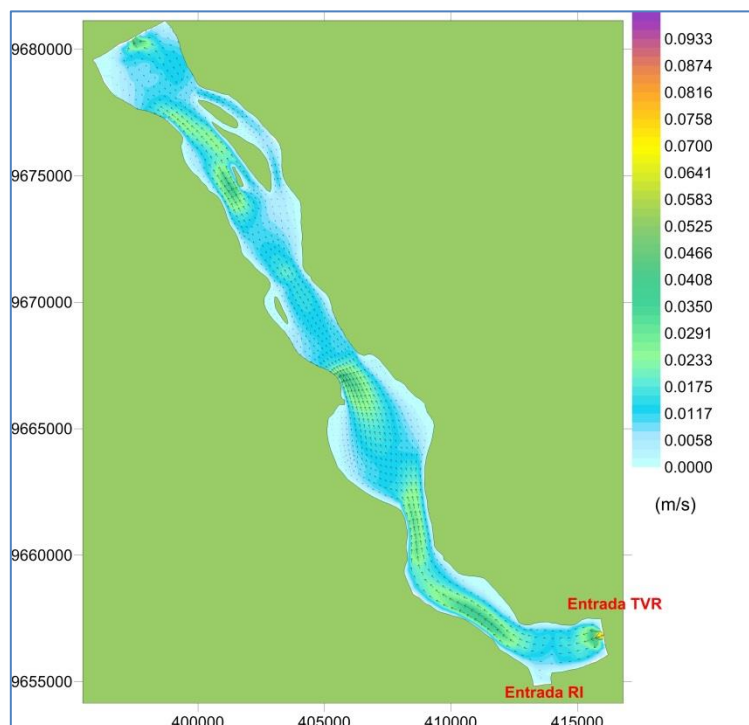


Figura 215: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.

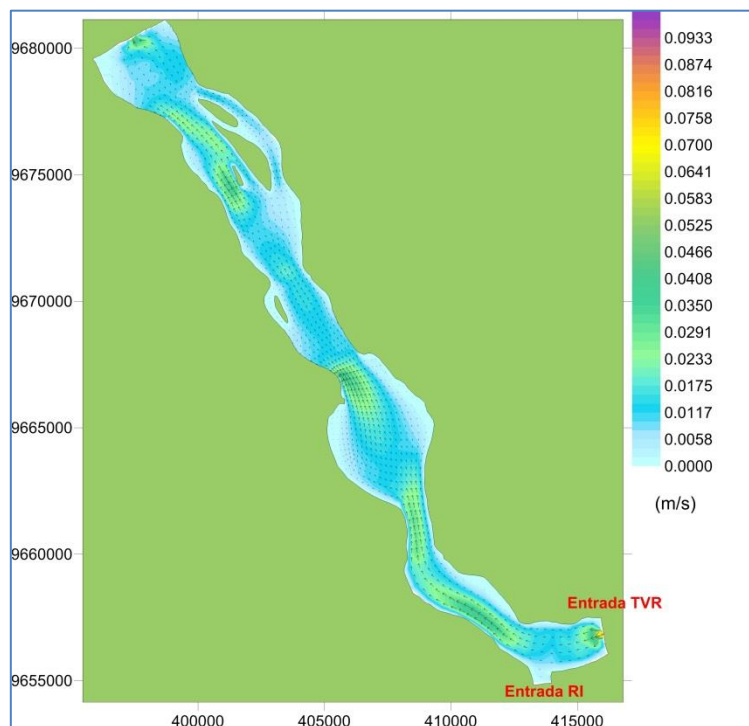


Figura 216: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.

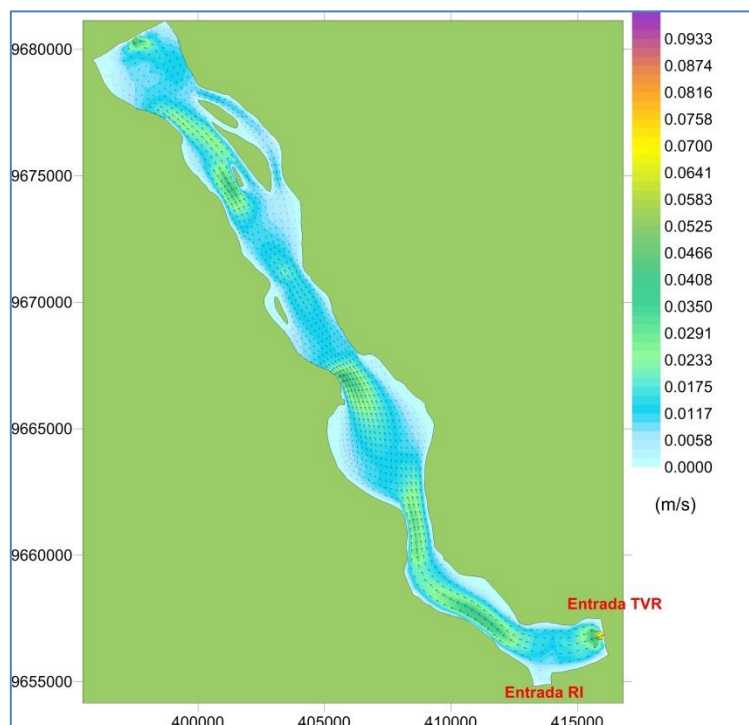
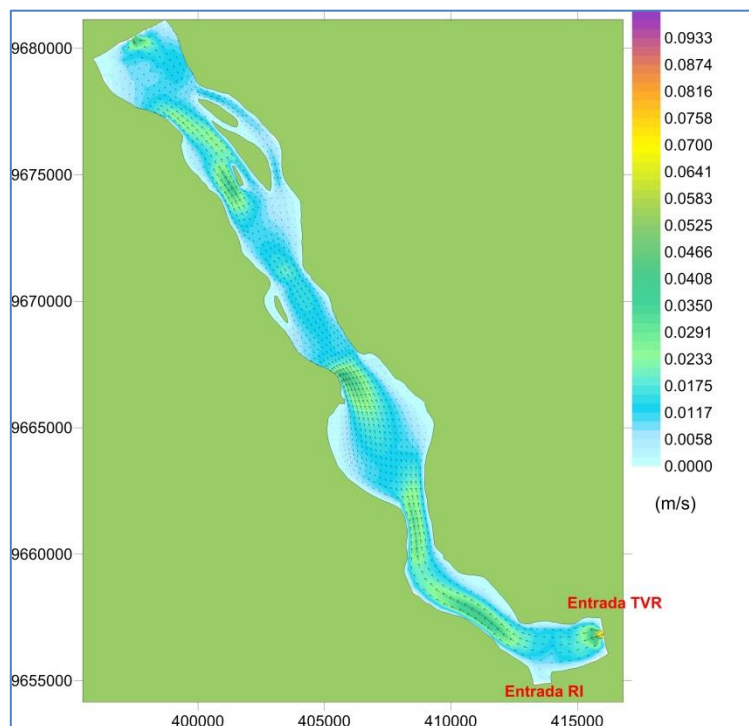
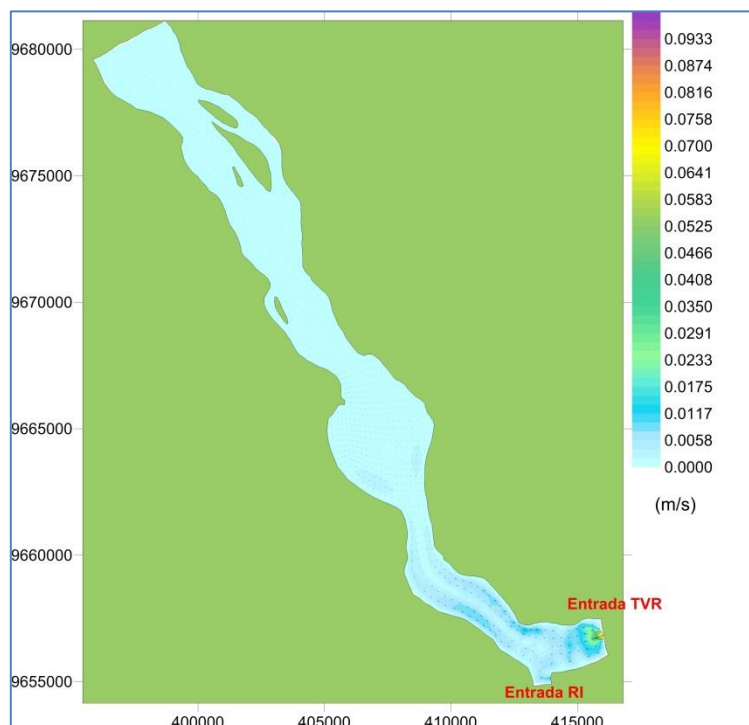


Figura 217: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.



**Figura 218: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



**Figura 219: Distribuição espacial das velocidades de corrente no Trecho de Restituição de Vazão no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

### 6.3. Implementação das simulações de qualidade da água

As condições de contorno e condições iniciais necessárias para o modelo de qualidade da água são as concentrações de todas as propriedades simuladas pelo SisBaHiA®, ou seja:

- Temperatura (°C)
- Salinidade (mg/L)
- Amônia (mg/L)
- Nitrato (mg/L)
- Zooplâncton (mg/L)
- Nitrogênio Orgânico (mg/L)
- Fósforo Inorgânico (mg/L)
- Fósforo Orgânico (mg/L)
- OD (mg/L)
- DBO (mg/L)
- Clorofila-a (µg/L)

Neste estudo não foram simulados salinidade e zooplâncton, sendo assim, a concentração delas foi considerada nula. No caso do TRV, as aflúências consideradas são as saídas do RI (água turbinada pela UHE Belo Monte) e do TVR.

Assim, as condições de contorno necessárias são provenientes das simulações de qualidade da água realizadas para o Reservatório do Xingu (água proveniente do TVR) e para o Reservatório Intermediário (água turbinada). Sendo assim, foi considerado o que se segue:

- A condição inicial do Trecho de Restituição de Vazão, que representa o estado inicial da qualidade da água da região a ser modelada, foi definida como sendo o primeiro valor das séries temporais dos parâmetros de interesse no ponto Barragem do Reservatório do Xingu (estas séries foram apresentadas na seção 4.4) - estes valores são apresentados na Tabela 19;
- Para a condição de contorno da entrada do trecho cuja aflúência é proveniente do TVR, as condições de contorno correspondem às séries temporais apresentadas na seção 4.4 para o ponto Barragem;

- De maneira semelhante, para a condição de contorno da entrada do trecho cuja afluência são as águas turbinadas da UHE Belo Monte, as condições de contorno são provenientes das simulações do RI – foram utilizadas séries temporais resultantes das simulações para um ponto localizado na saída do Reservatório Intermediário.

Tabela 19: Condições iniciais utilizadas nas modelagens de qualidade da água do TRV.

Parâmetro	Condição inicial do TRV
Temperatura da água (°C)	27,03
OD (mg/L)	5,45
Fósforo Total (mg/L)	0,026
Fósforo Inorgânico (mg/L)	0,017
Fósforo Orgânico (mg/L)	0,009
Nitrato (mg/L)	0,35
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,06
Nitrogênio orgânico (mg/L)	0,35
DBO (mg/L)	1,00
Clorofila-a (µg/L)	1,60

Os parâmetros usados nas reações cinéticas do modelo de qualidade da água são os mesmos utilizados para o Reservatório do Xingu e apresentados na Tabela 15 (maiores informações poderão ser obtidas em ROSMAN, 2016).

#### 6.4. Resultados das simulações de qualidade da água

Da mesma forma que para o Reservatório do Xingu, os resultados de qualidade da água para o TRV são apresentados em forma de distribuição espacial para o período de estiagem (15 de setembro), e de séries temporais para dois pontos – um logo após a confluência das vazões do TVR e do RI (Est A), e outro próximo à saída do domínio de modelagem do TRV (Est B) – a localização destes pontos pode ser visualizada nas figuras que representam as distribuições espaciais das variáveis simuladas. São apresentados resultados para os parâmetros DBO (demanda bioquímica de oxigênio), OD (oxigênio dissolvido), Nitrogênio Amoniacal, Nitrato, Fósforo Total, Clorofila-a, além de resultados para temperatura da água.

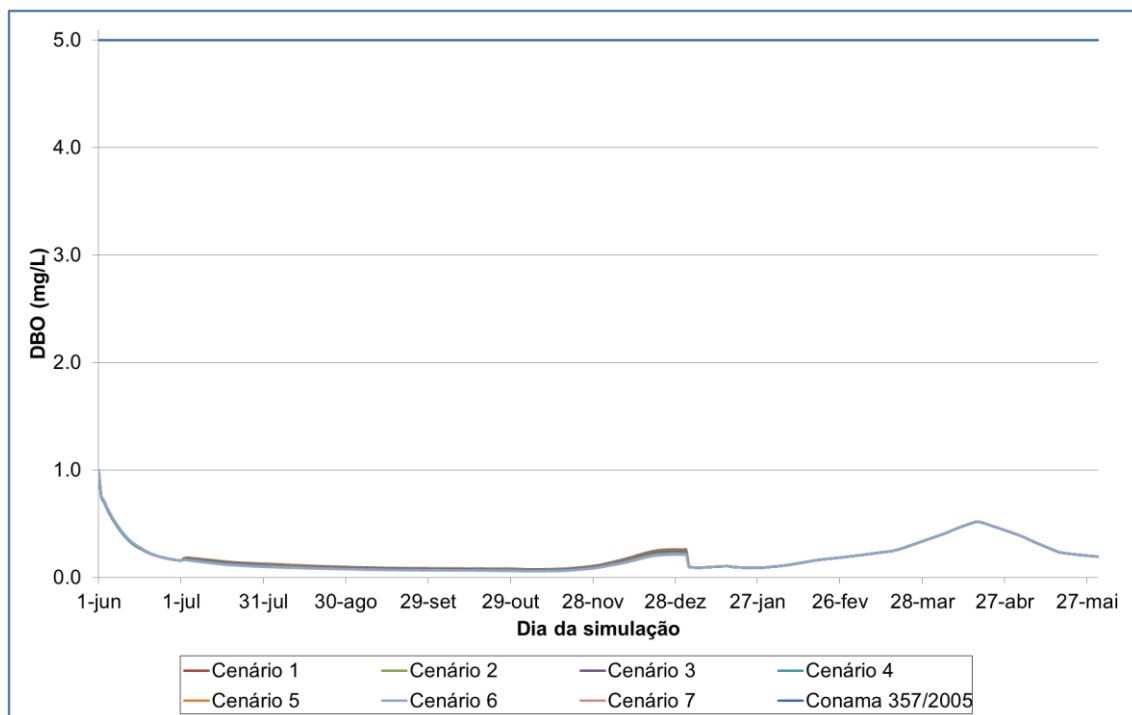
Da mesma forma, deve-se ter em mente que os resultados obtidos a partir da modelagem bidimensional com o SisBaHiA<sup>®</sup> representam médias na direção vertical do reservatório. Estes são comparados com os valores estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos de classe 2, cujos valores foram apresentados na Tabela 16; ainda, para fins de comparação, para o Fósforo Total, adotou-se o limite de 0,05 mg/L, valor referente a ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias.

Os resultados, espaciais e temporais, para todos os cenários, são apresentados nas próximas seções.

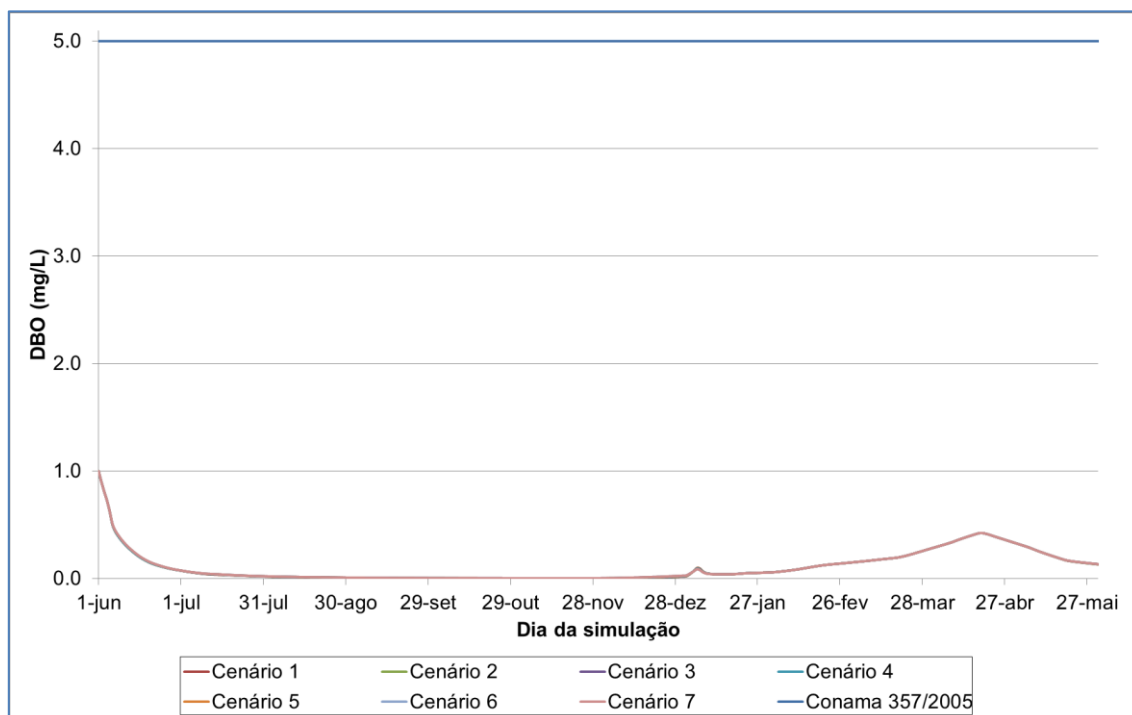
#### 6.4.1. **Resultados para Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)**

Para os pontos Est A e Est B, as evoluções temporais de DBO são apresentadas na Figura 40 e na Figura 41. Em ambos os casos, para os pontos analisados, a máxima concentração observada não ultrapassa 1,0 mg/L, e chegam muito próximo de zero, não ultrapassando o limite legal máximo de 5,0 mg/L, além disso, as duas séries temporais são muito semelhantes durante todo o período simulado. Destaca-se que, eventuais alterações de DBO podem ocorrer em função da hidrodinâmica da região.

As distribuições espaciais das concentrações de DBO para o período de estiagem são apresentadas da Figura 222 até a Figura 228, respectivamente para os cenários 1 a 7. Observam-se distribuições espaciais muito semelhantes – maiores concentrações de DBO são observadas no início da área do domínio simulado - sendo da ordem de 0,15 mg/L - e diminuem ao longo o eixo do TRV, se aproximando de zero. Isto indica que, em termos de DBO, não há comprometimento da qualidade da água do trecho de jusante do Complexo da UHE Belo Monte.



**Figura 220: Evolução temporal das concentrações de DBO (mg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão.**



**Figura 221: Evolução temporal das concentrações de DBO (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão.**



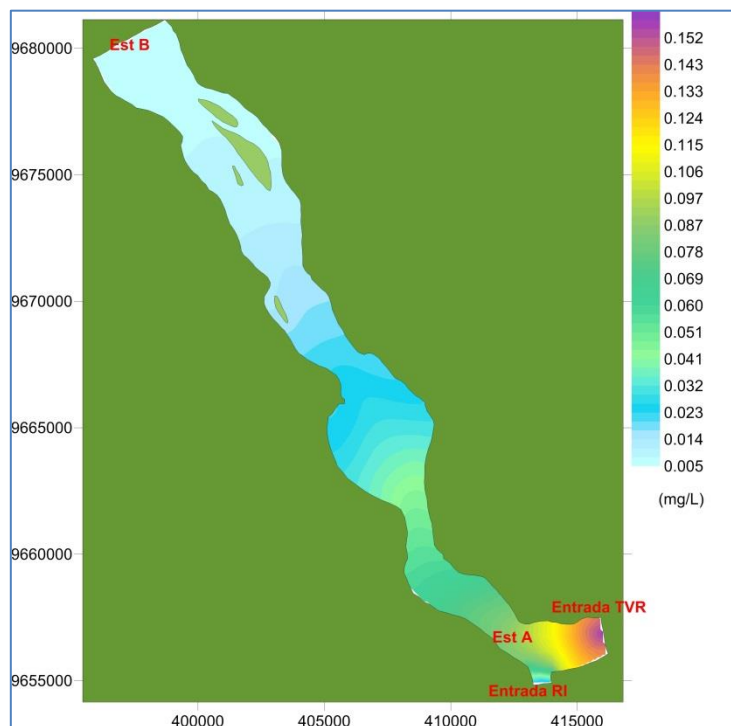


Figura 222: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.

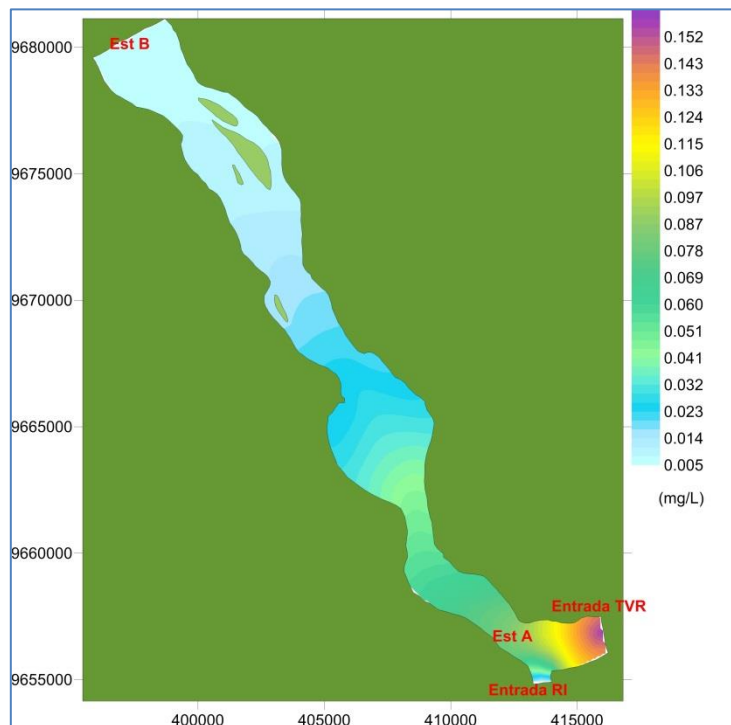
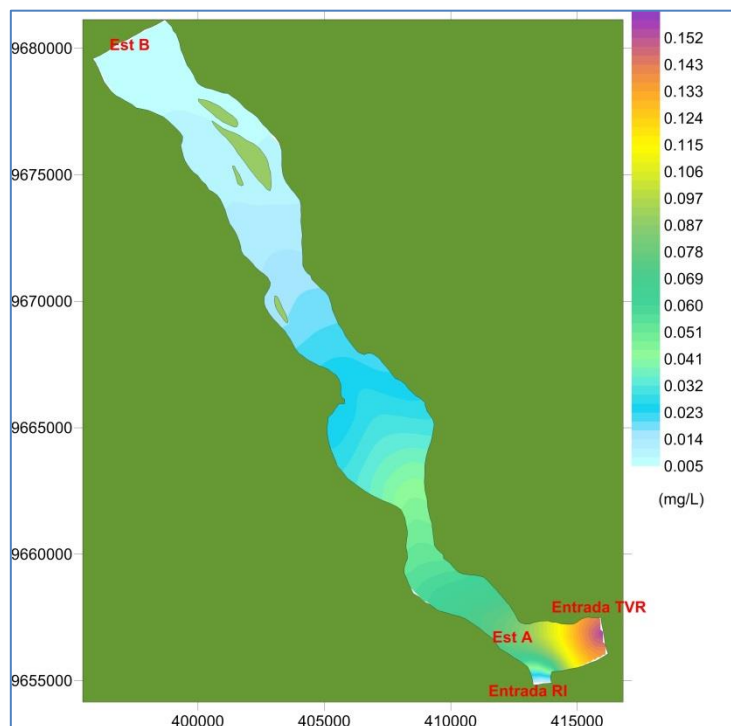
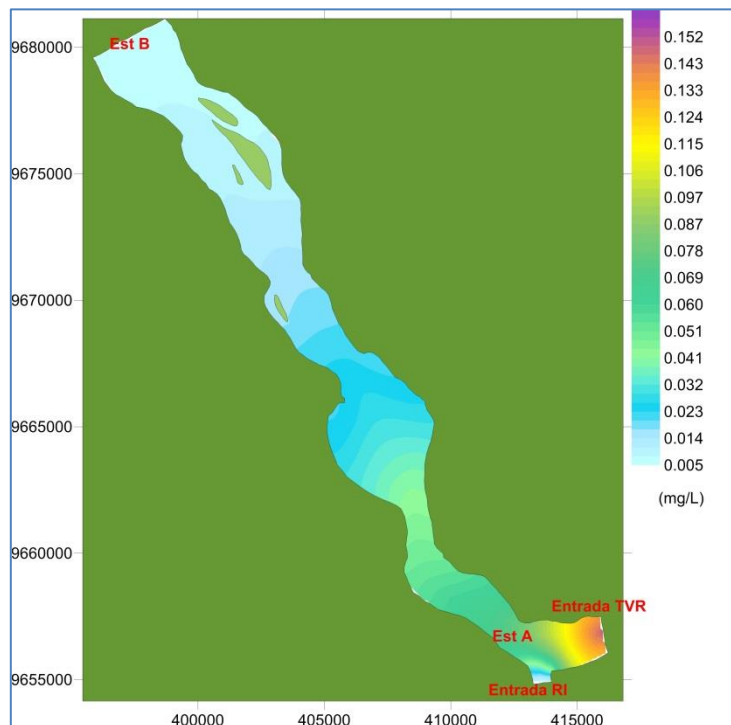


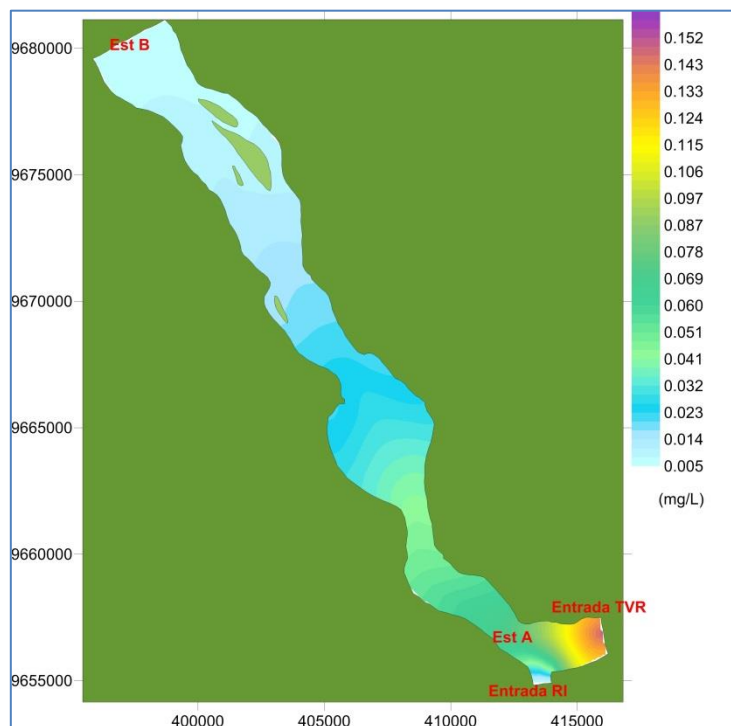
Figura 223: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.



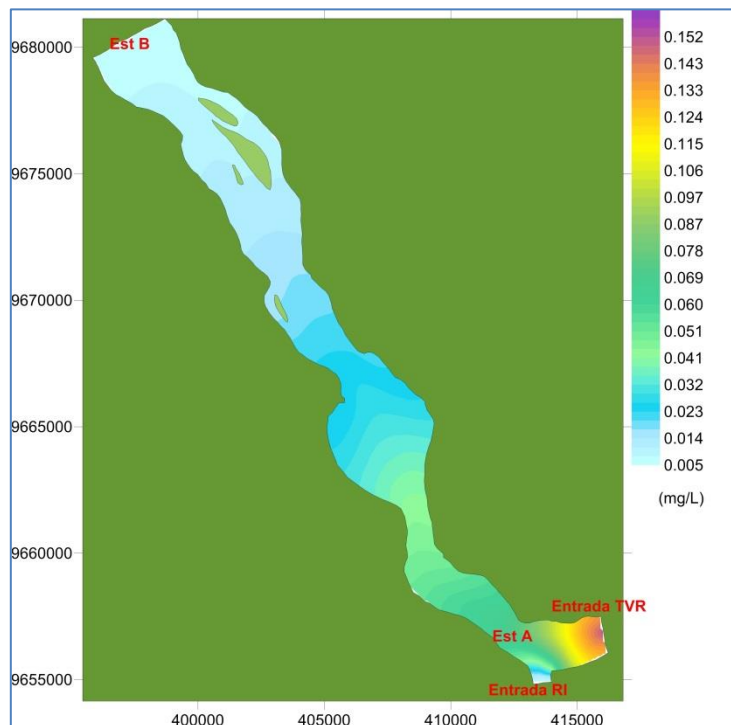
**Figura 224: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



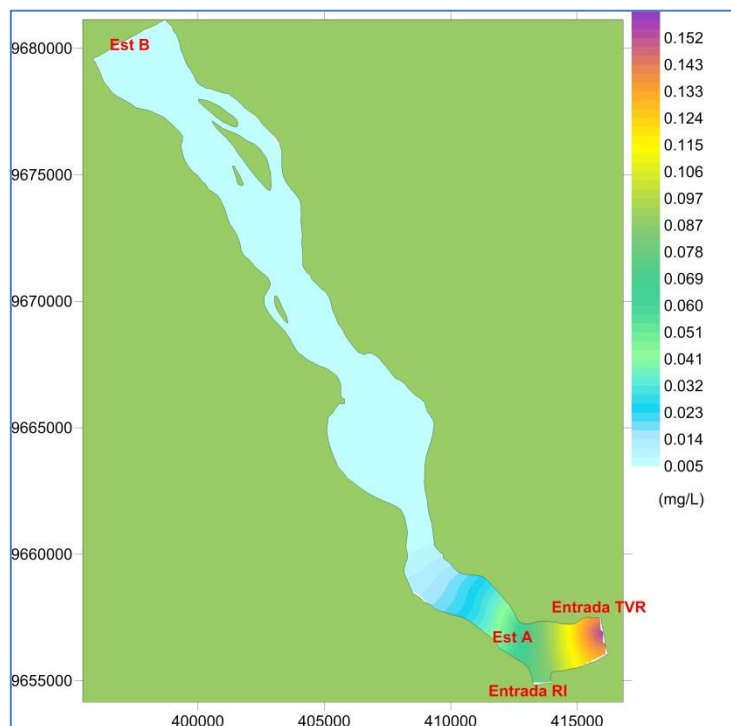
**Figura 225: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 226: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 227: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**

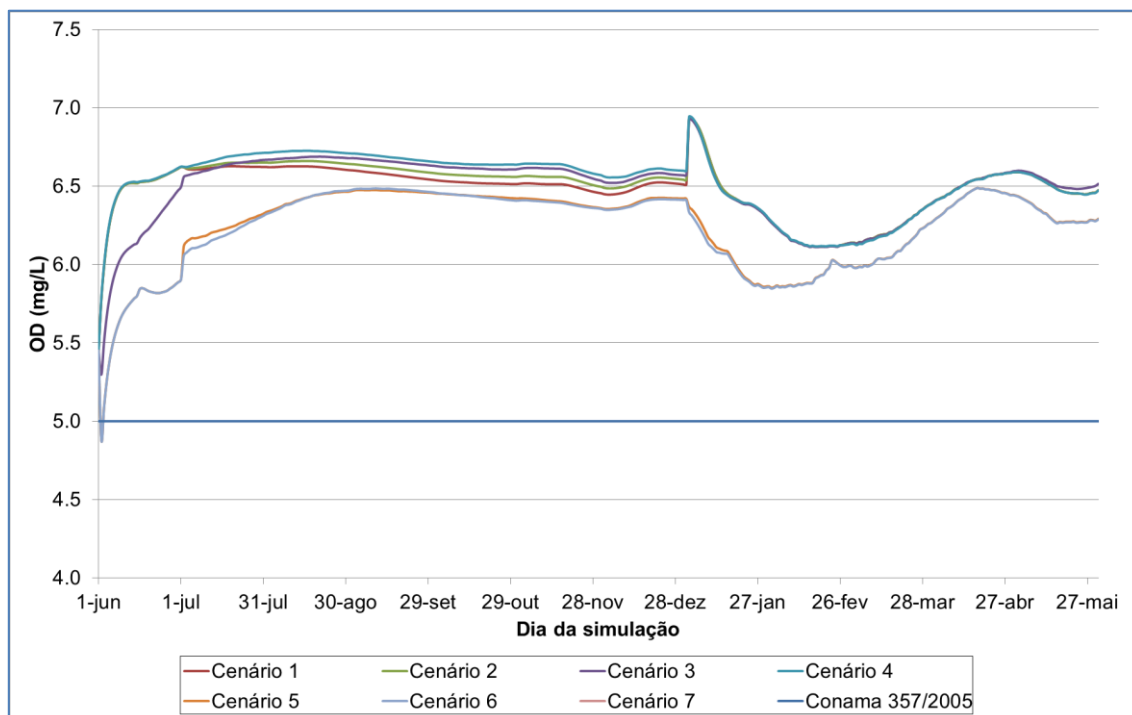


**Figura 228: Distribuição espacial das concentrações de DBO no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

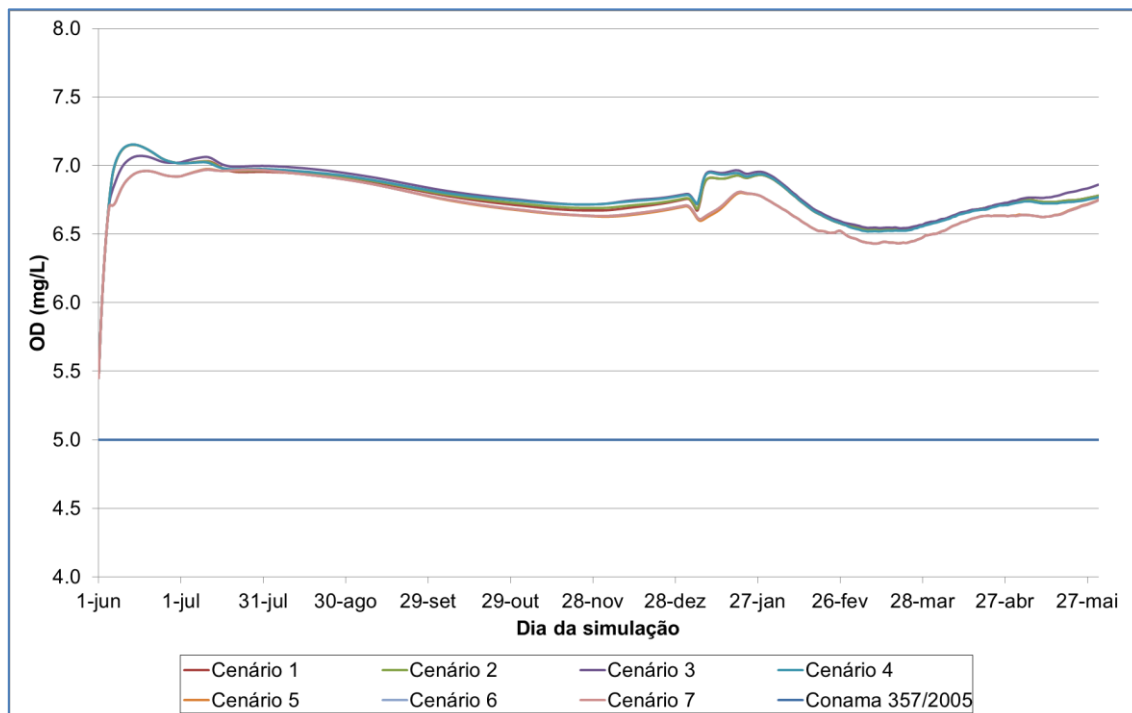
#### 6.4.2. Resultados para Oxigênio Dissolvido (OD)

As evoluções temporais de OD nos pontos Est A e Est B são apresentadas, respectivamente, na Figura 229 e na Figura 230 - nos dois pontos as concentrações ao longo do tempo são semelhantes e ficam sempre entre 5,0 e 7,0 mg/L – valores acima do limite legal mínimo de 5,0 mg/L (Resolução CONAMA 357/2005 para Classe 2).

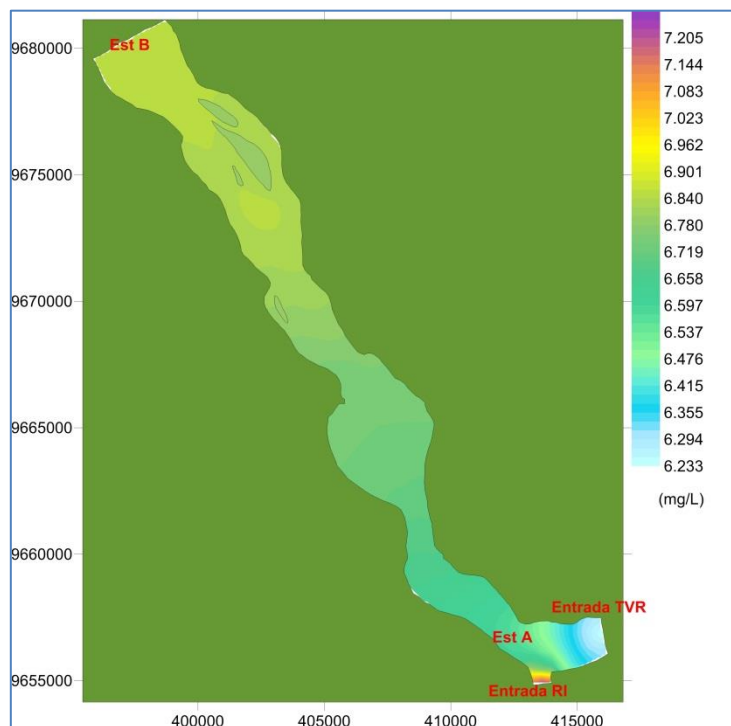
Da Figura 231 até a Figura 237 são apresentadas as distribuições espaciais das concentrações de OD para o período de estiagem (15 de setembro). Estas são muito semelhantes em todos os cenários, e as amplitudes de variação ao longo do domínio simulado variam entre 6,2 e 7,2 mg/L, ou seja, acima do limite legal. Como esperado, as regiões de menores concentrações de OD correspondem às regiões de maiores concentrações de DBO.



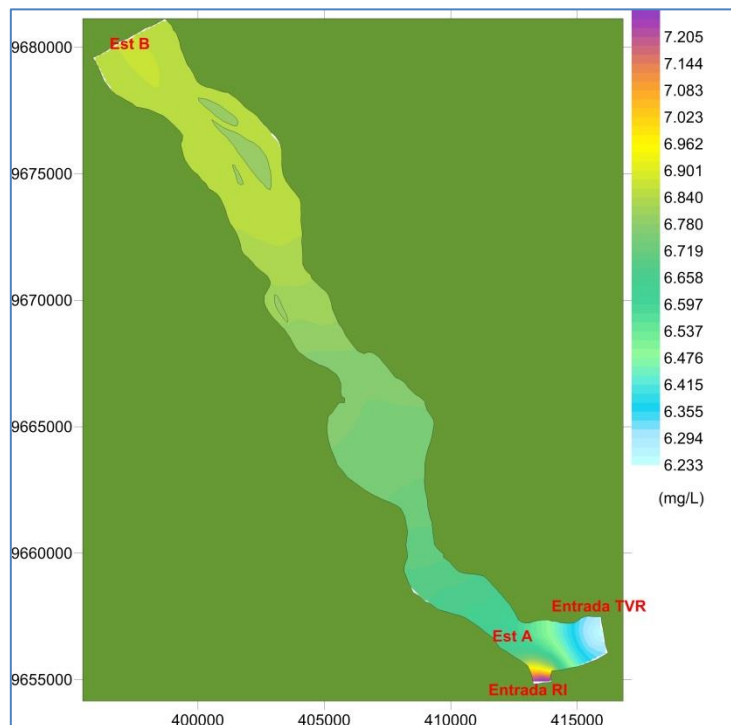
**Figura 229: Evolução temporal das concentrações de OD (mg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão.**



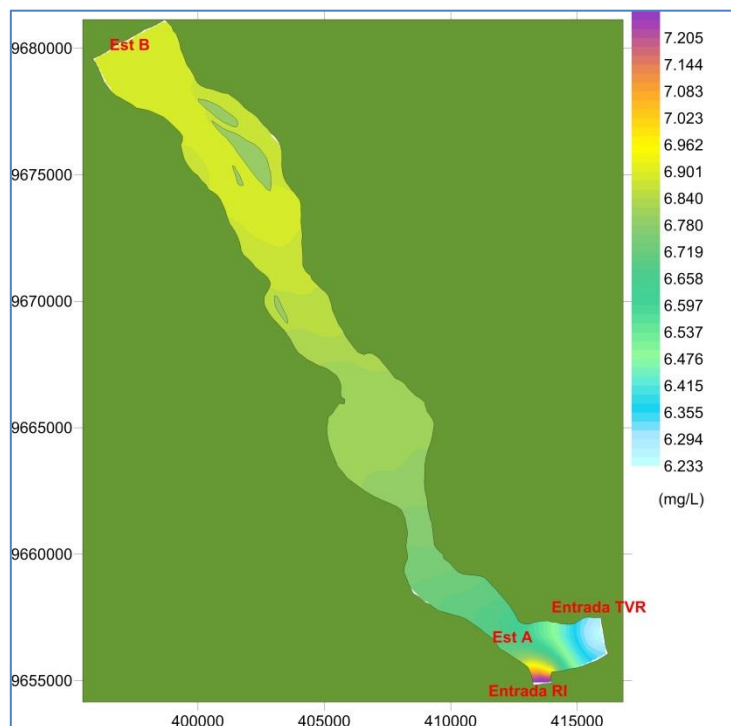
**Figura 230: Evolução temporal das concentrações de OD (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão.**



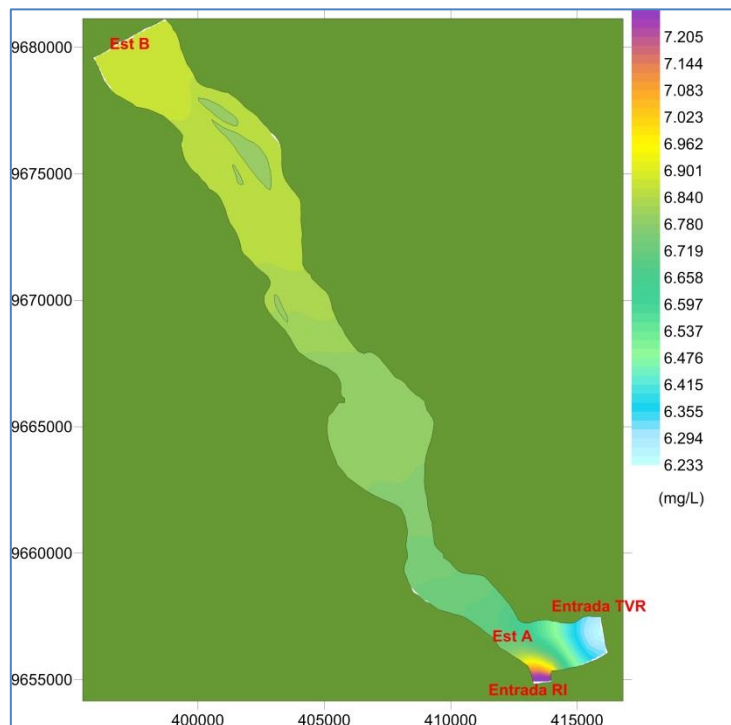
**Figura 231: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



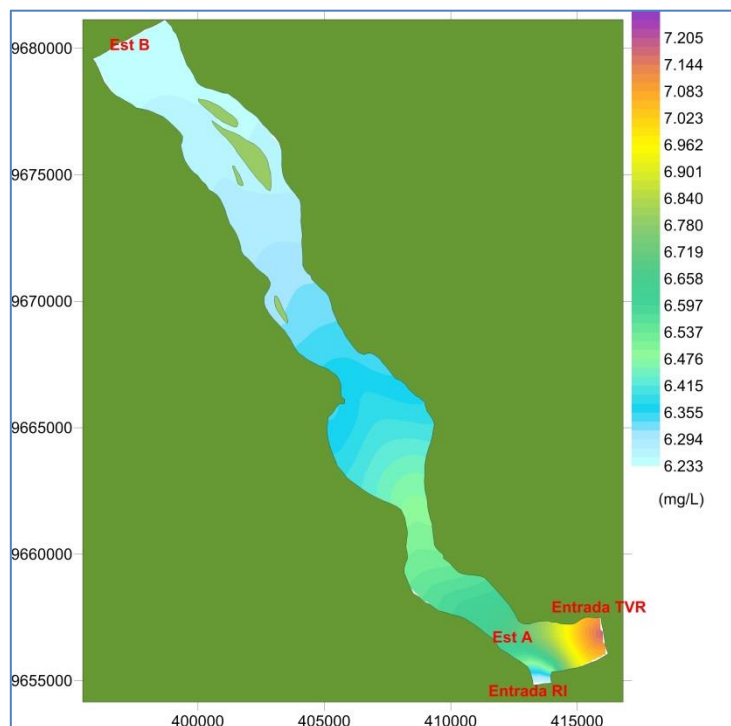
**Figura 232: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



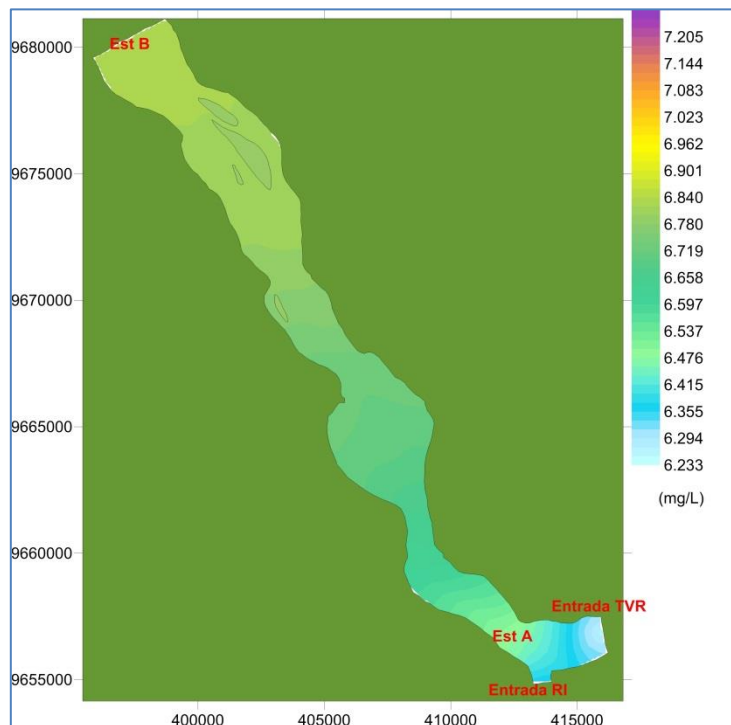
**Figura 233: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



**Figura 234: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**

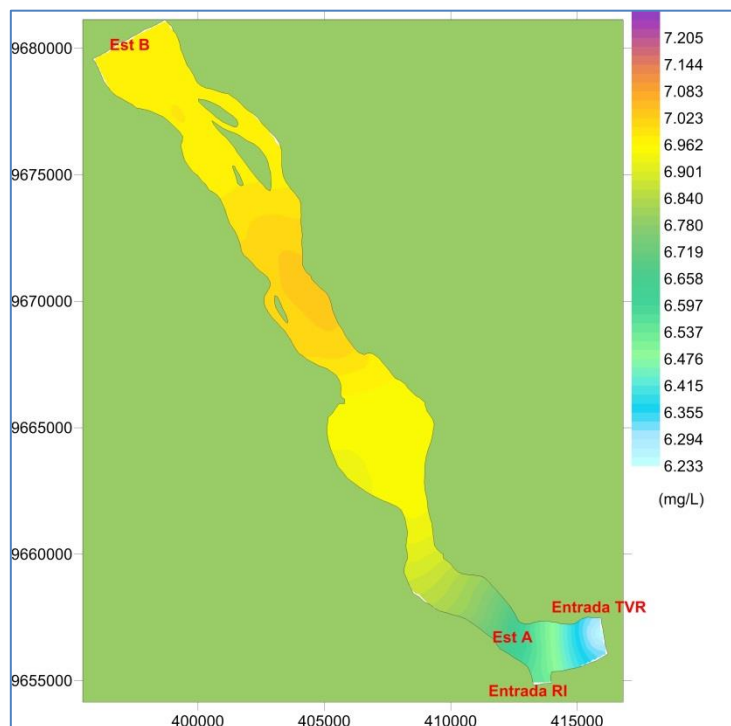


**Figura 235: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 236: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



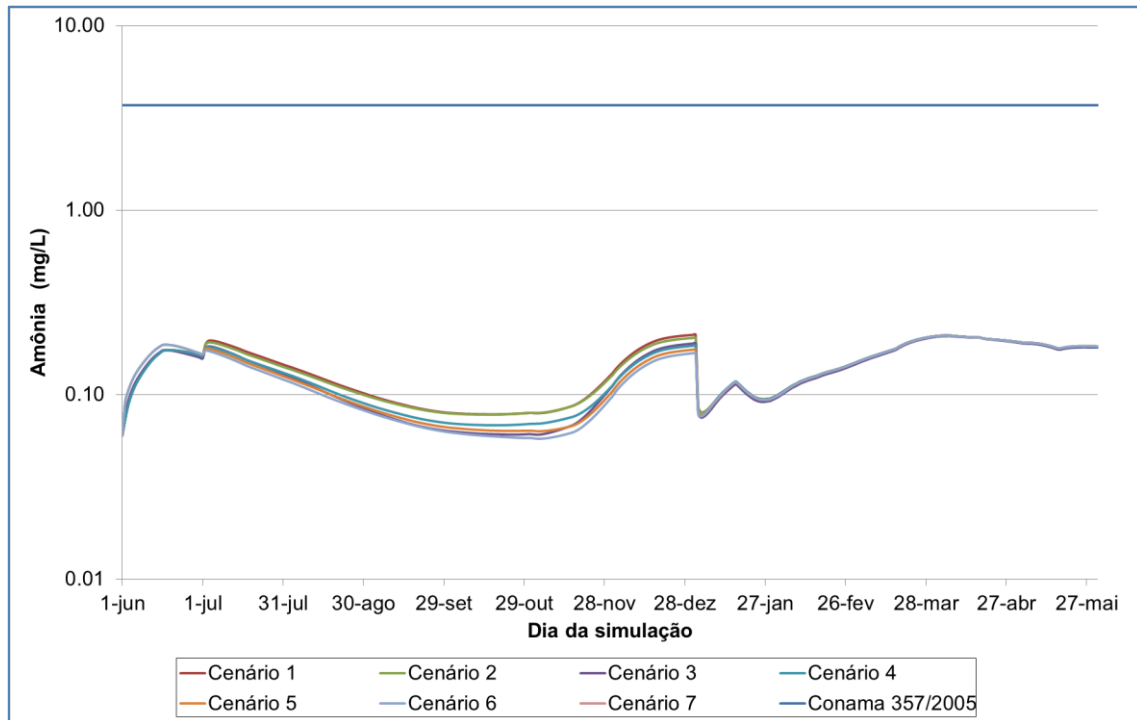


**Figura 237: Distribuição espacial das concentrações de OD no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

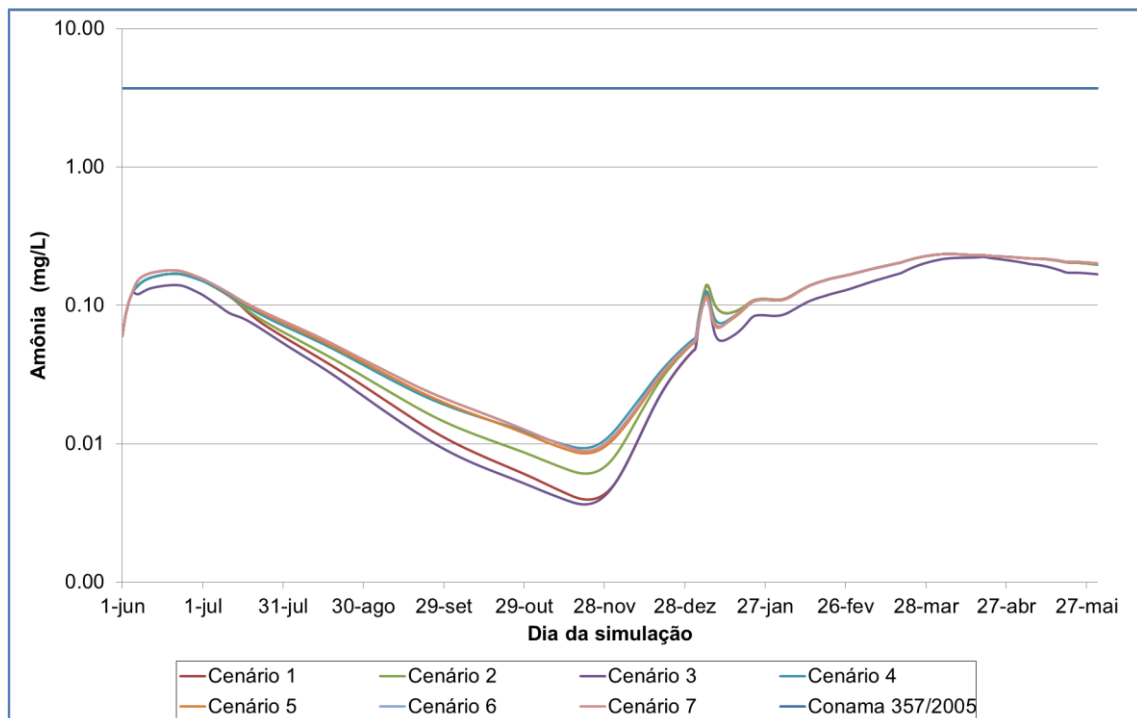
#### 6.4.3. Resultados para Nitrogênio Amoniacal

Para Nitrogênio Amoniacal, as evoluções temporais são apresentadas na Figura 238 e na Figura 239 respectivamente para os pontos Est A e Est B – as concentrações estão em escala logarítmica. Observa-se, no ponto Est A, concentrações maiores do que no ponto Est B, as quais são da ordem de 0,1 mg/L no primeiro ponto e da ordem de 0,01 mg/L no segundo ponto – valores menores do que o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para Classe 2, em corpos hídricos com  $\text{pH} < 7,5$ , o qual é de 3,7 mg/L.

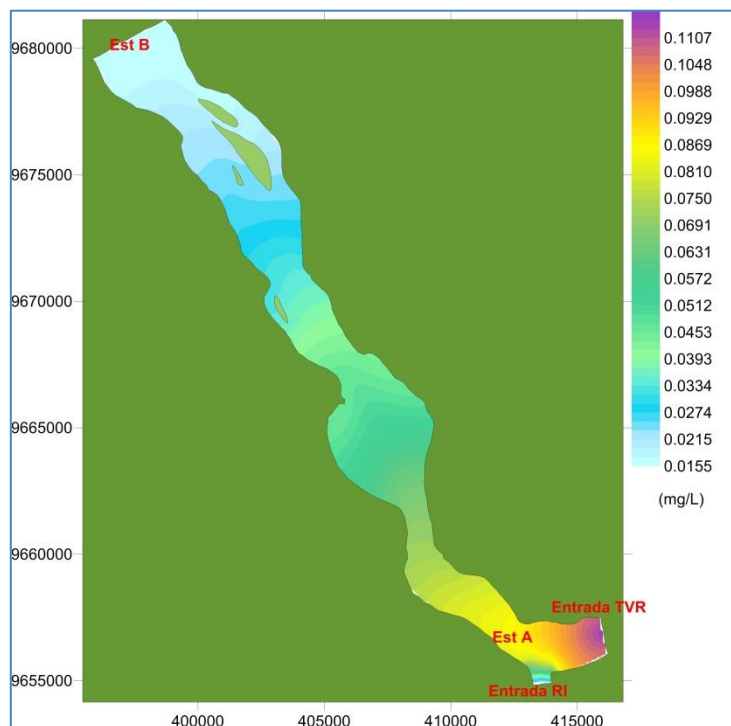
Espacialmente, para o período de estiagem, as distribuições são apresentadas da Figura 240 até a Figura 246. Estas distribuições confirmam o observado nas séries temporais – são maiores na região de montante (onde está o ponto Est A), e se reduzem ao longo do eixo do domínio simulado (na direção do ponto Est B). Em termos de amplitude de concentração, estas variam entre 0,01 e 0,1 mg/L.



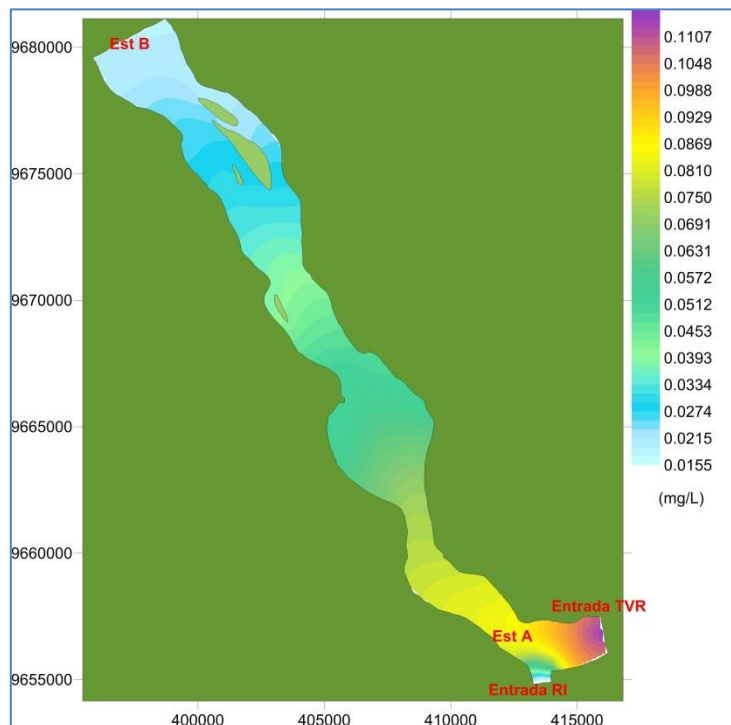
**Figura 238: Evolução temporal das concentrações de Amônia (mg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão.**



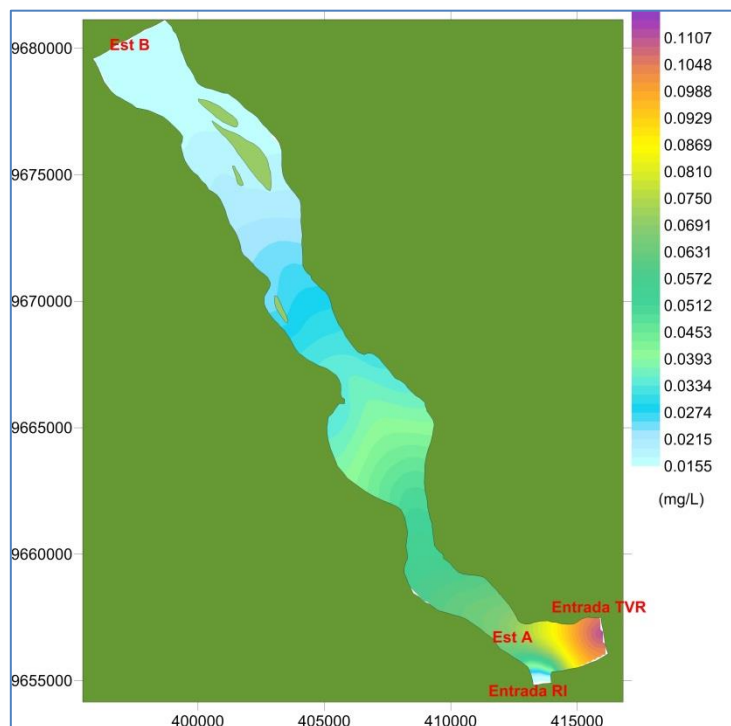
**Figura 239: Evolução temporal das concentrações de Amônia (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão.**



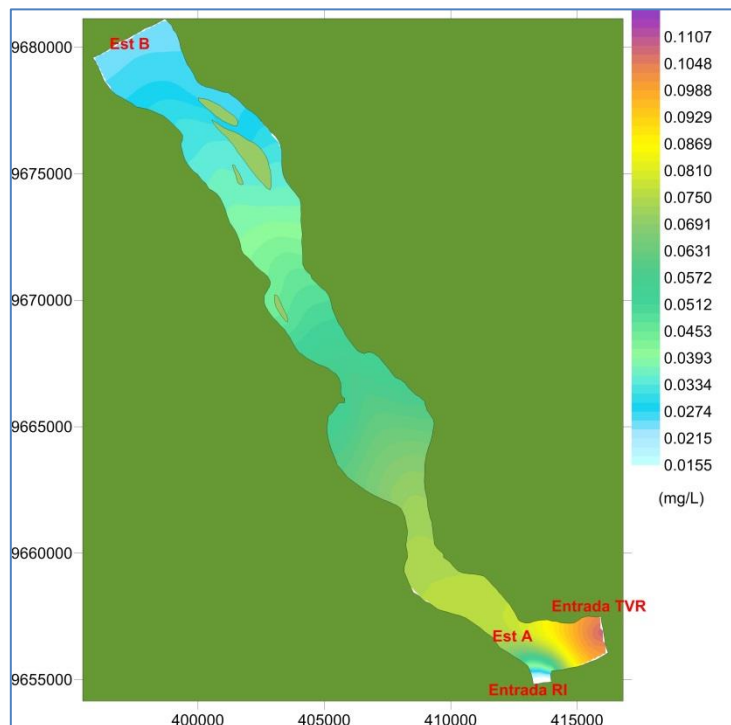
**Figura 240: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



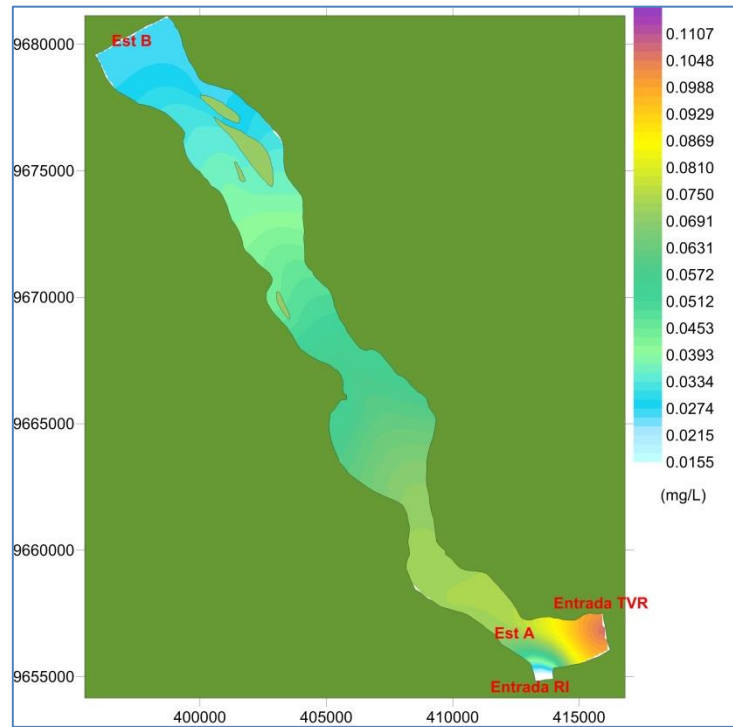
**Figura 241: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



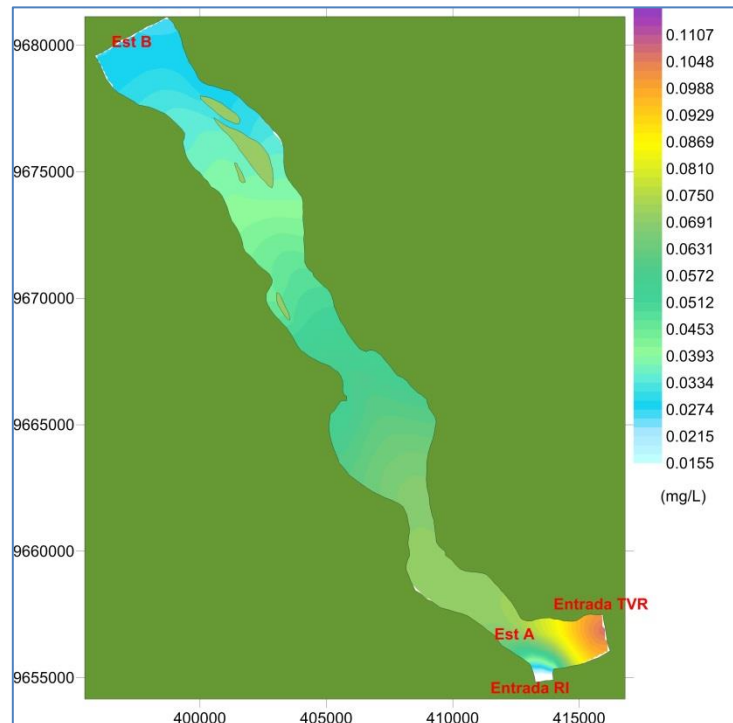
**Figura 242: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



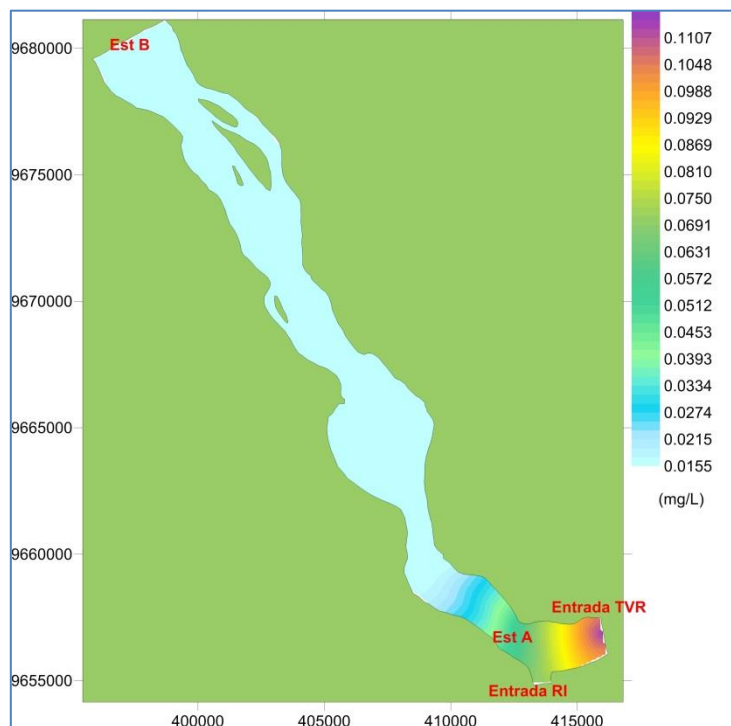
**Figura 243: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 244: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 245: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**

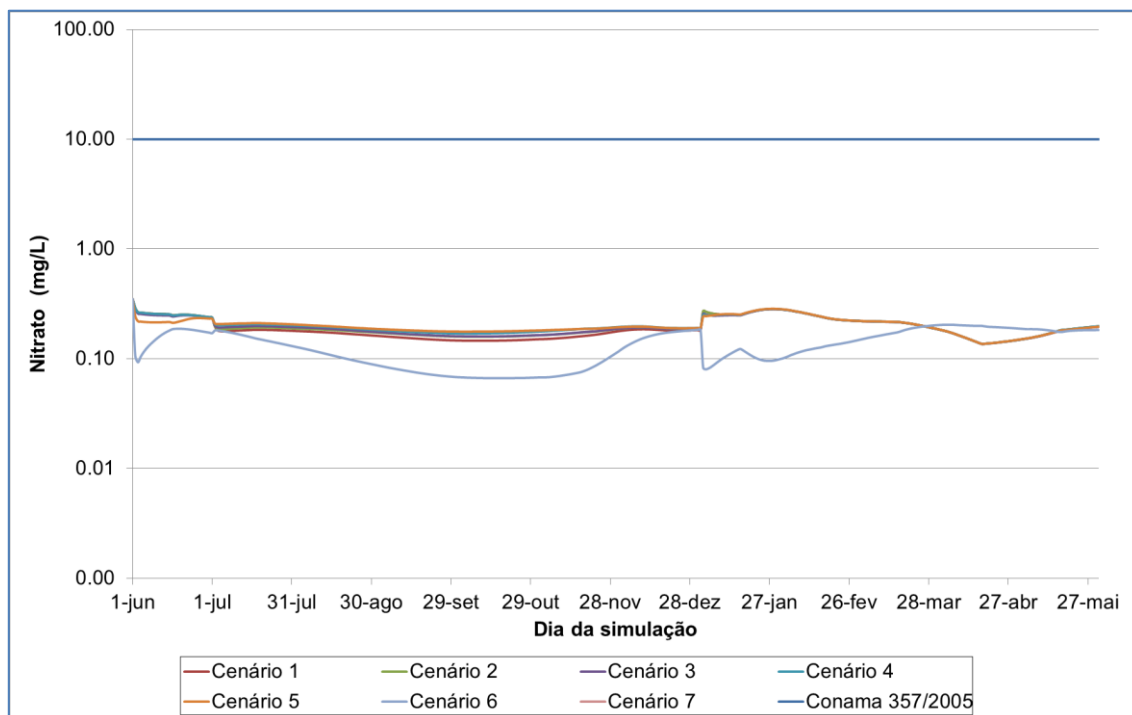


**Figura 246: Distribuição espacial das concentrações de Amônia no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

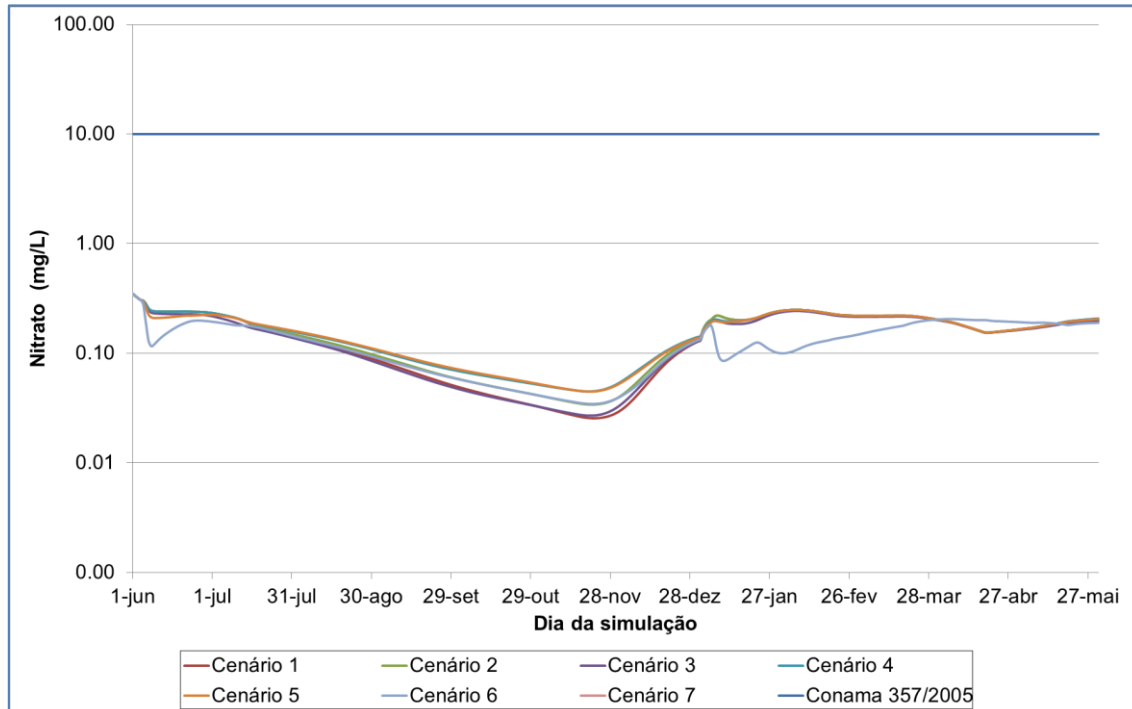
#### 6.4.4. Resultados para Nitrato

Para Nitrato, as evoluções temporais são apresentadas na Figura 247 e na Figura 248 (ambas em escala logarítmica). Em comparação com o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para Classe 2 – 10,0 mg/L – os valores simulados para esse parâmetro são baixos, não ultrapassando 0,35 mg/L.

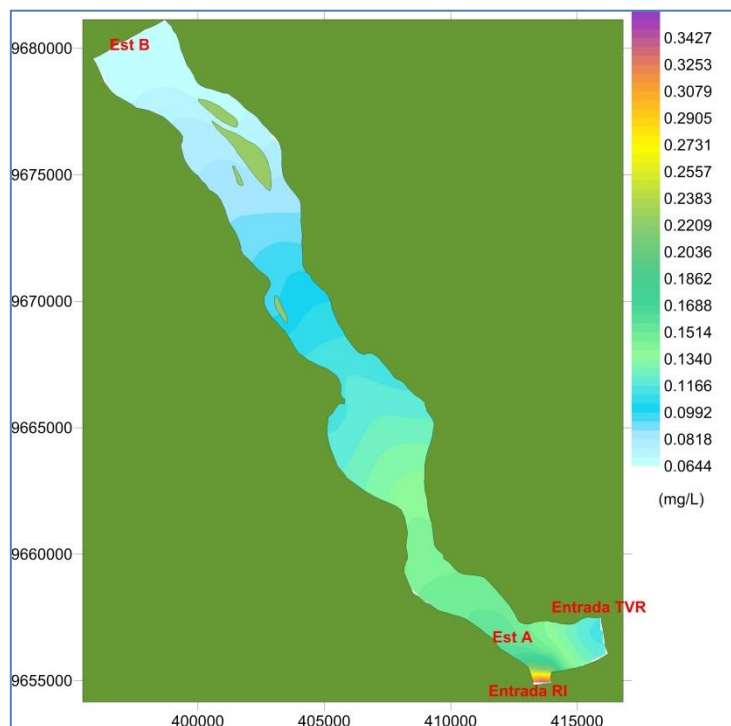
O mesmo pode ser observado nas distribuições espaciais (Figura 249 até Figura 255) para o período de estiagem. As maiores concentrações são observadas na região de saída do RI; estas se devem às concentrações impostas por meio da condição de contorno nesse ponto. Para o Cenário 7, no entanto, isso não ocorre pois não há entrada de água por esse ponto (vazão turbinada é nula). Ao longo do TRV, as concentrações diminuem, e os valores de concentração, assim como observado nas séries temporais, variam entre 0,06 e 0,35 mg/L.



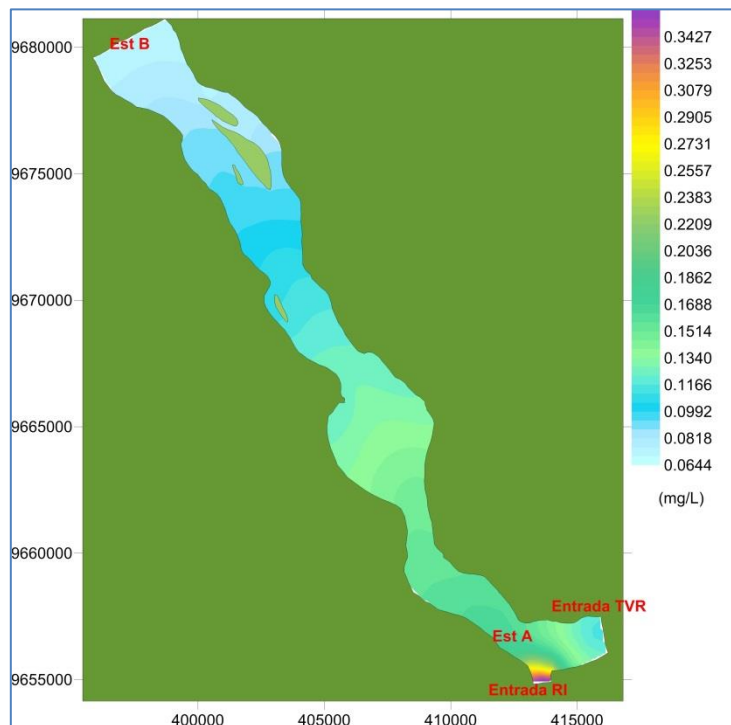
**Figura 247: Evolução temporal das concentrações de Nitrato (mg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão.**



**Figura 248: Evolução temporal das concentrações de Nitrato (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão.**

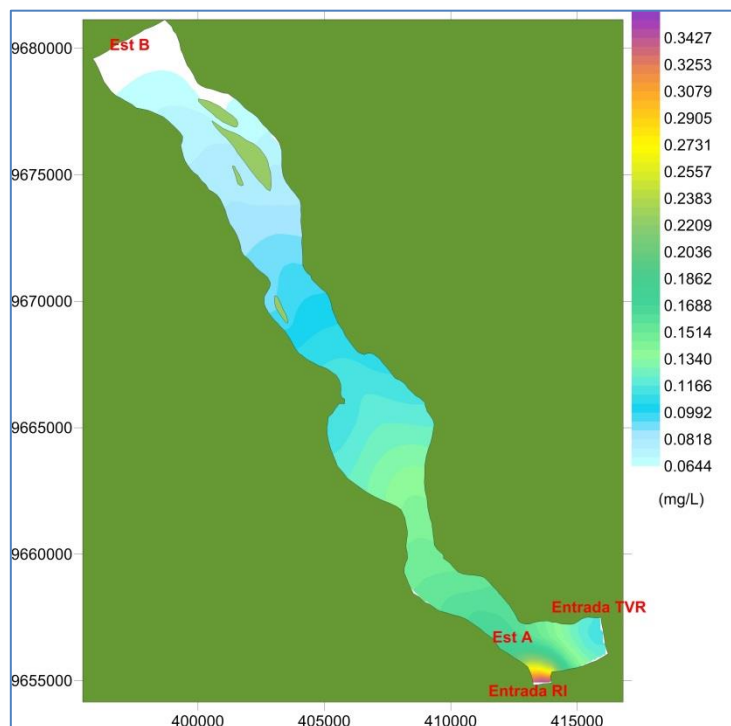


**Figura 249: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**

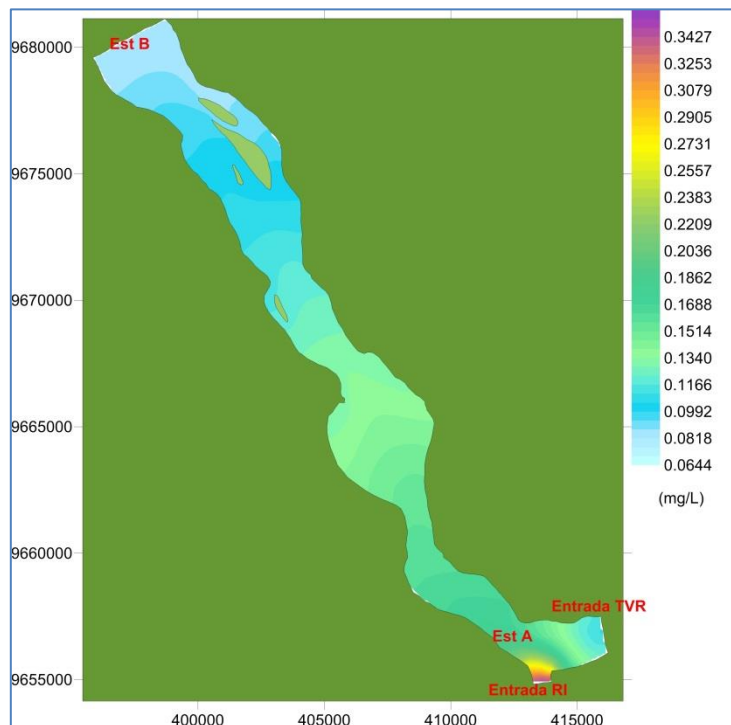


**Figura 250: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**

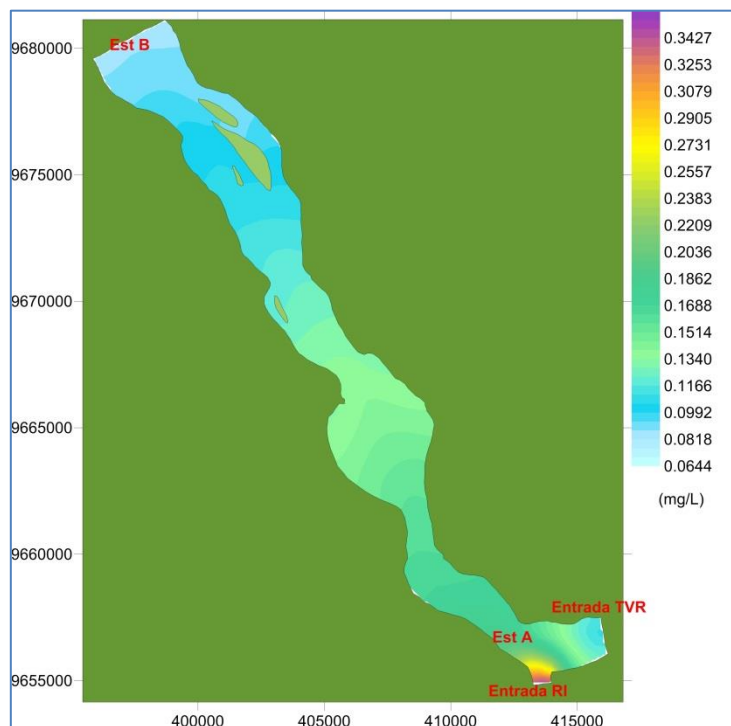




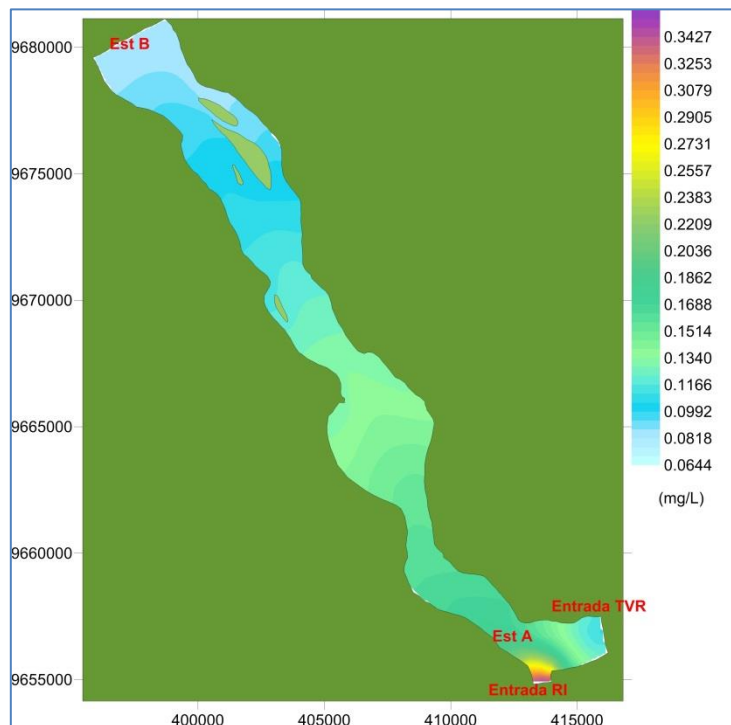
**Figura 251: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



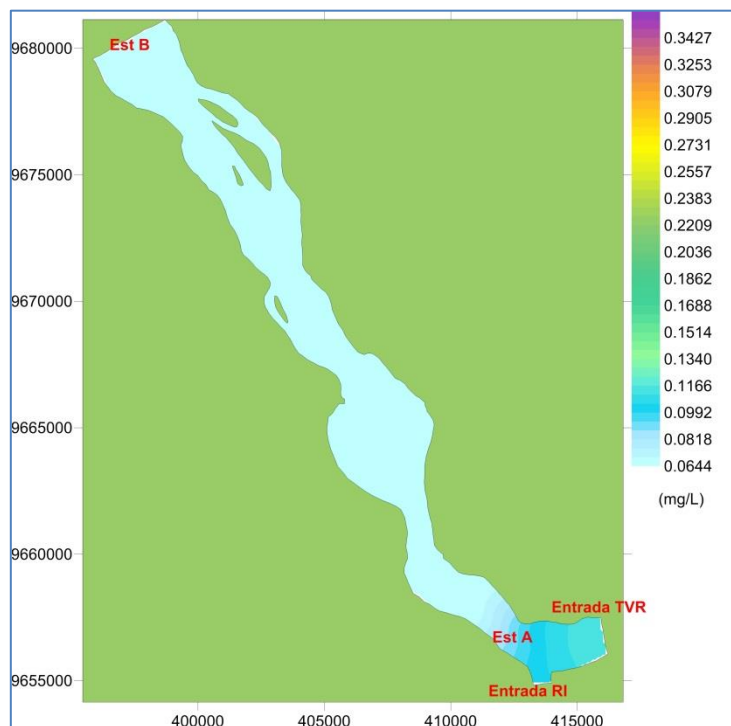
**Figura 252: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 253: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 254: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**

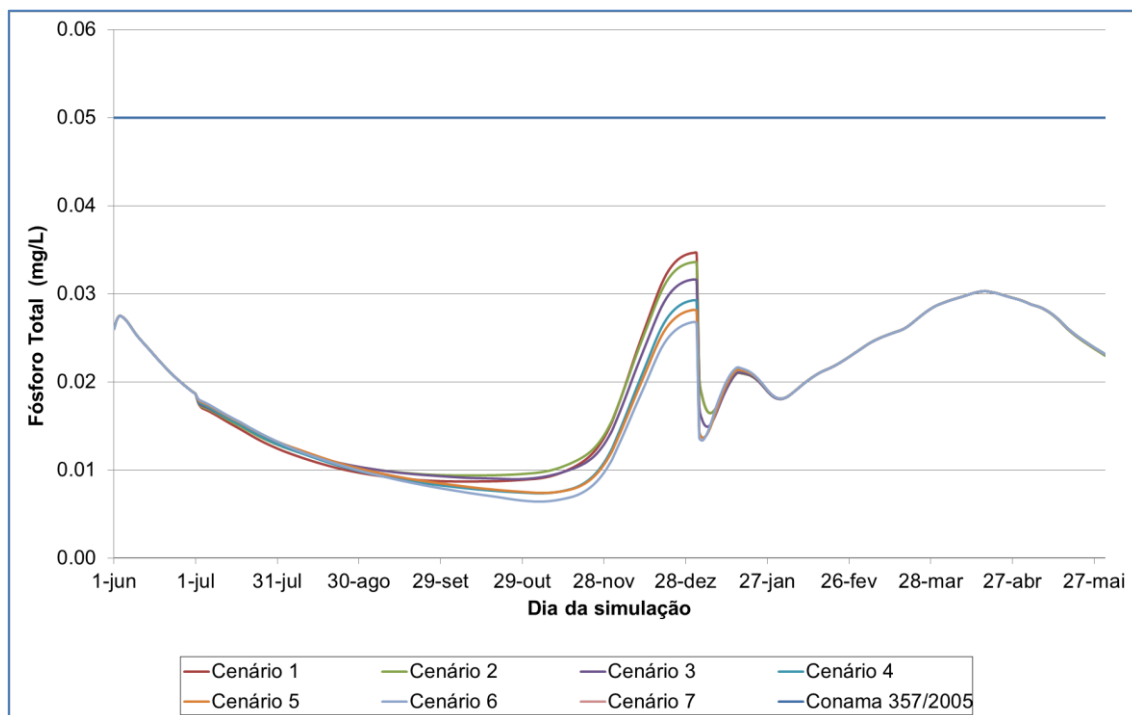


**Figura 255: Distribuição espacial das concentrações de Nitrato no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

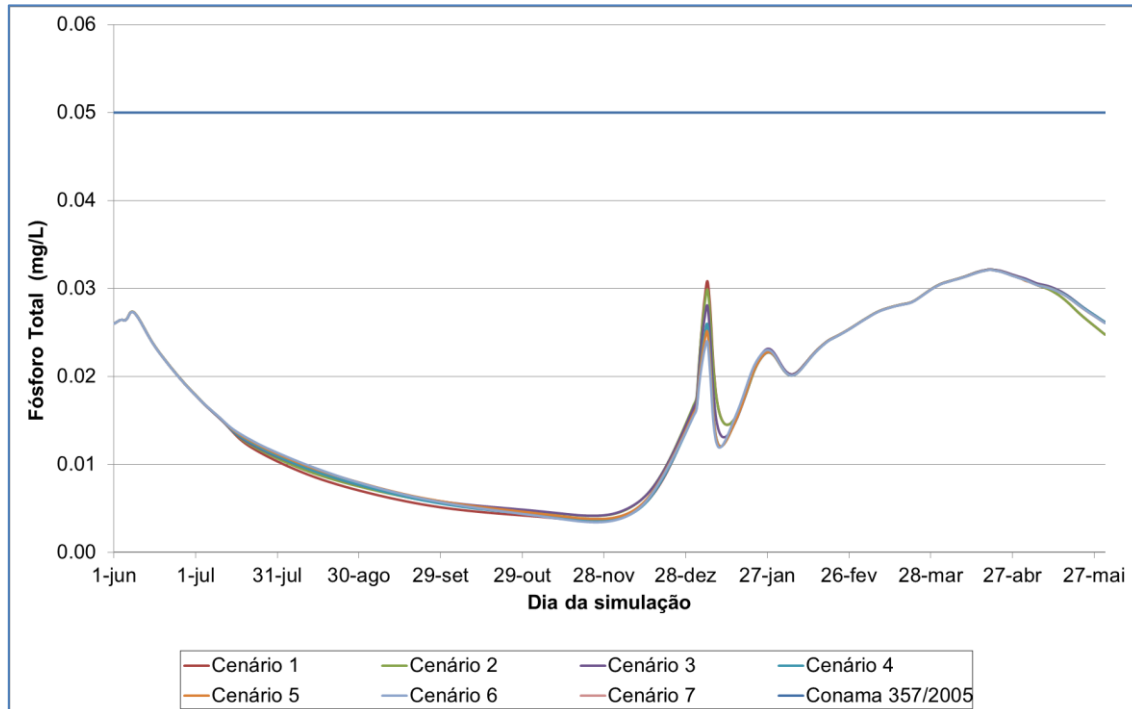
#### 6.4.5. Resultados para Fósforo Total

Para Fósforo Total, o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 é de 0,05 mg/L. Nas evoluções temporais, apresentadas na Figura 256 e na Figura 257, observa-se que os resultados das simulações ficam abaixo desse valor, variando entre 0,005 e 0,035 mg/L.

As distribuições espaciais para o período de estiagem são mostradas da Figura 258 até Figura 264. Com exceção da região da entrada do RI (entrada das vazões turbinadas), as distribuições espaciais são semelhantes; conforme descrito na definição dos cenários, as vazões na entrada do RI aumentam do Cenário 1 até o Cenário 6, e no Cenário 7 é igual a zero. Assim, pode-se dizer que quanto maior a vazão turbinada, menor a concentração de fósforo na região próxima da saída do RI. Em termos de amplitude de variação das concentrações, os valores variam entre 0,005 e 0,02 mg/L, abaixo do limite estabelecido pela legislação.



**Figura 256: Evolução temporal das concentrações de Fósforo Total (mg/L) no ponto Est A, após o ponto de restituição de vazão.**



**Figura 257: Evolução temporal das concentrações de Fósforo Total (mg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão.**

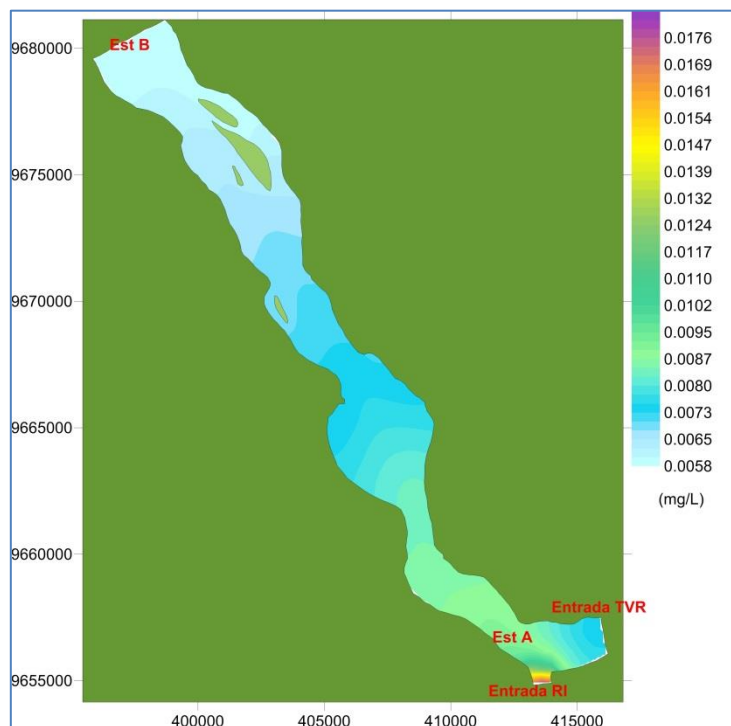


Figura 258: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.

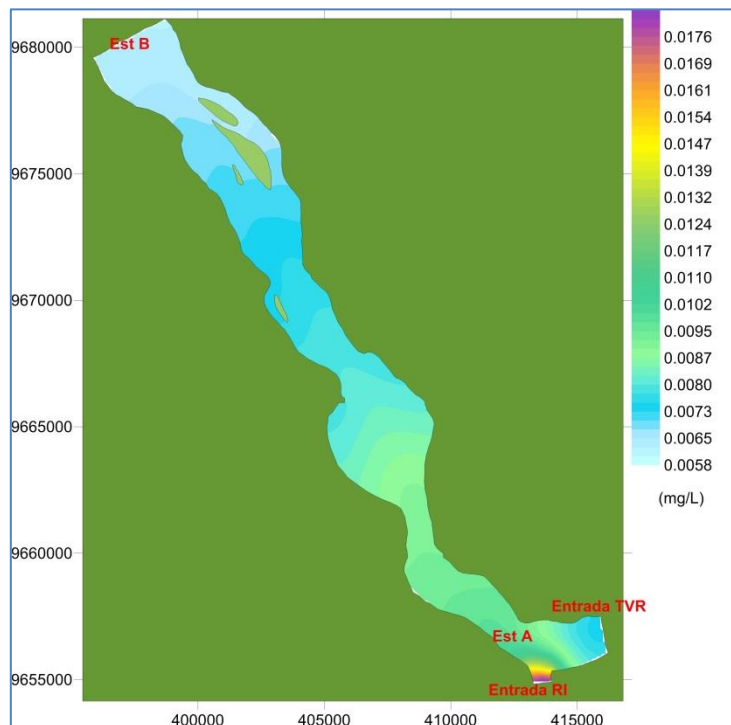
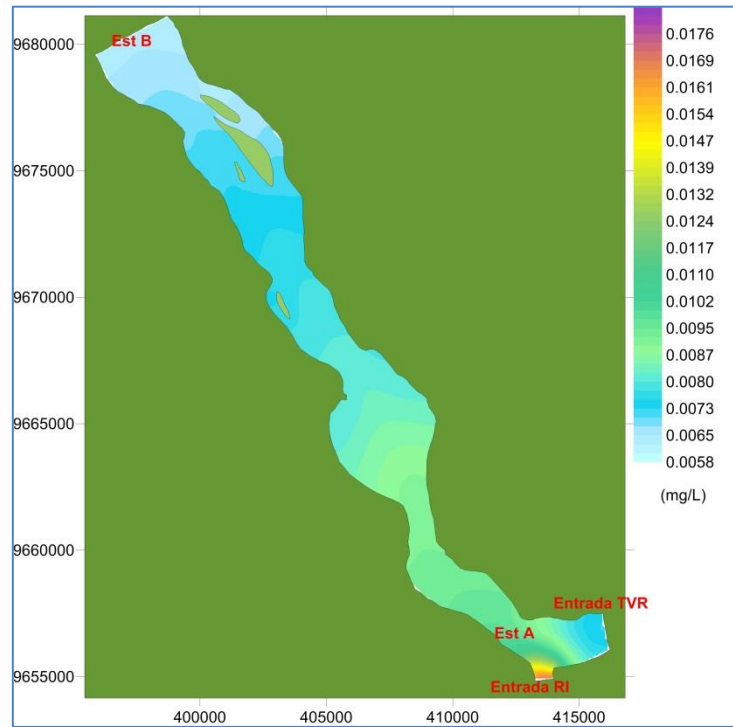
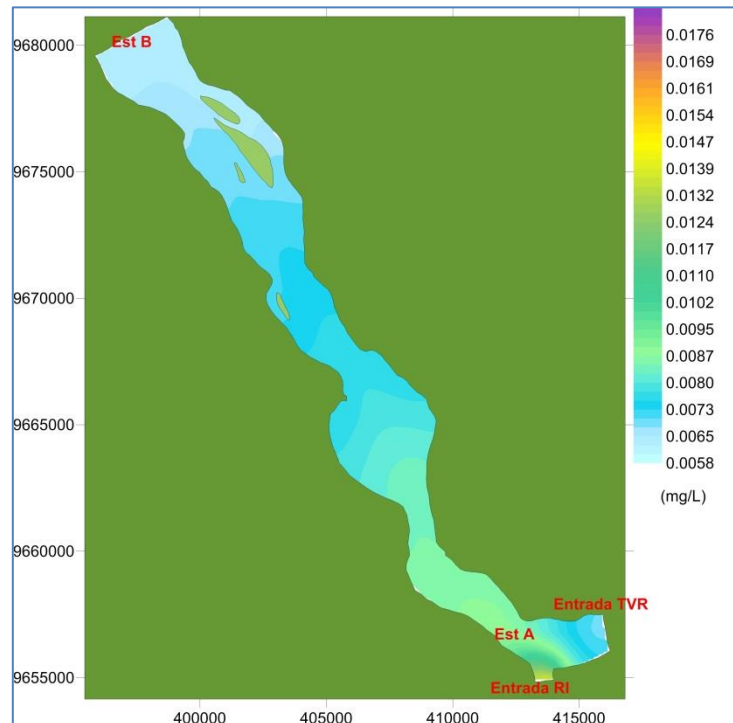


Figura 259: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.



**Figura 260: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



**Figura 261: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**

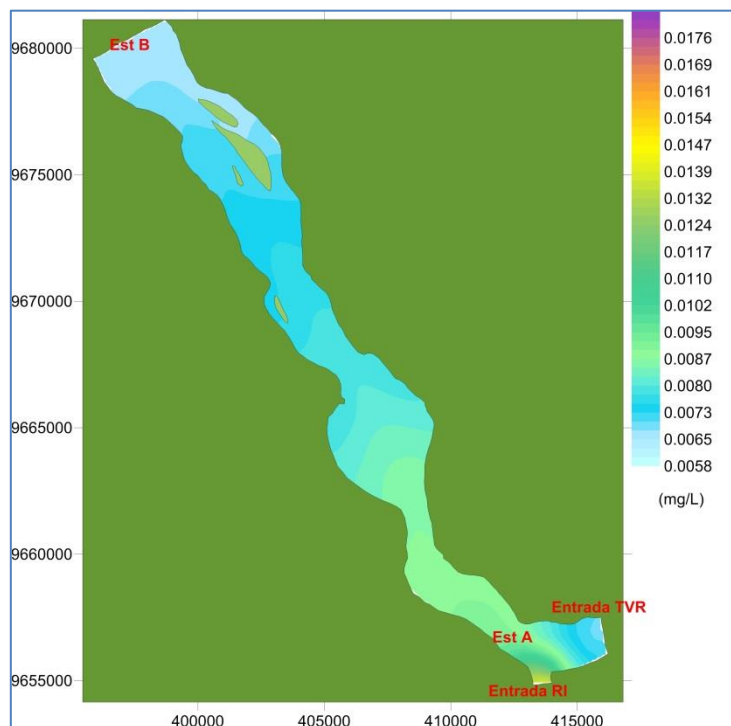


Figura 262: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.

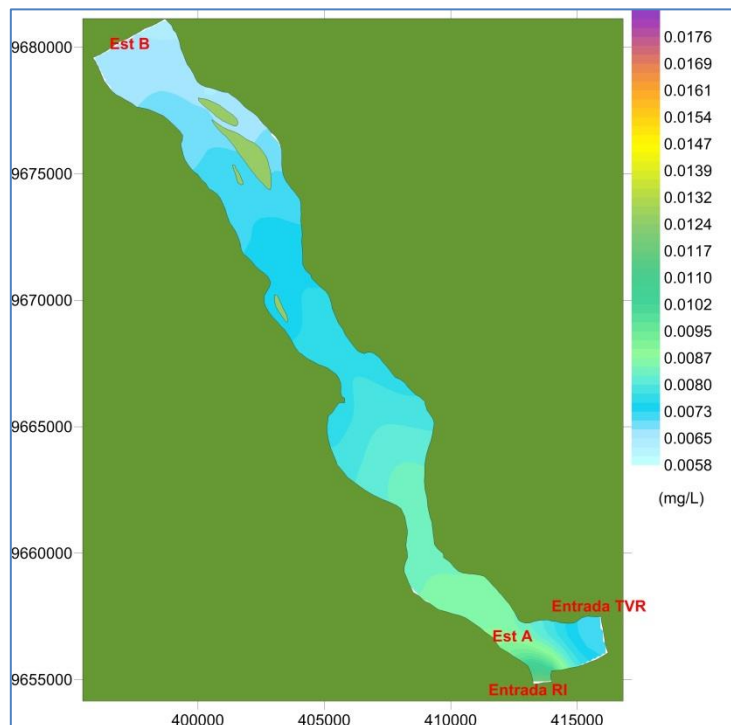
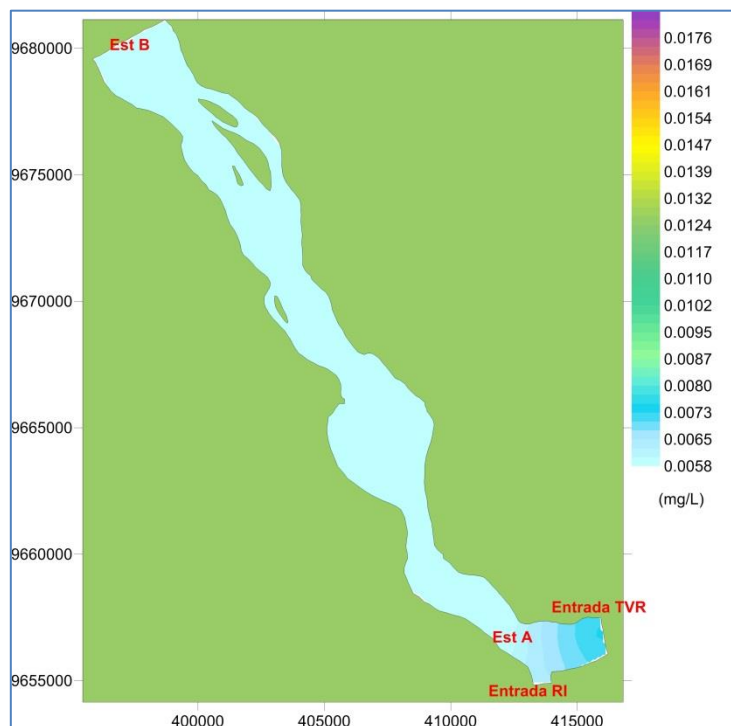


Figura 263: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.

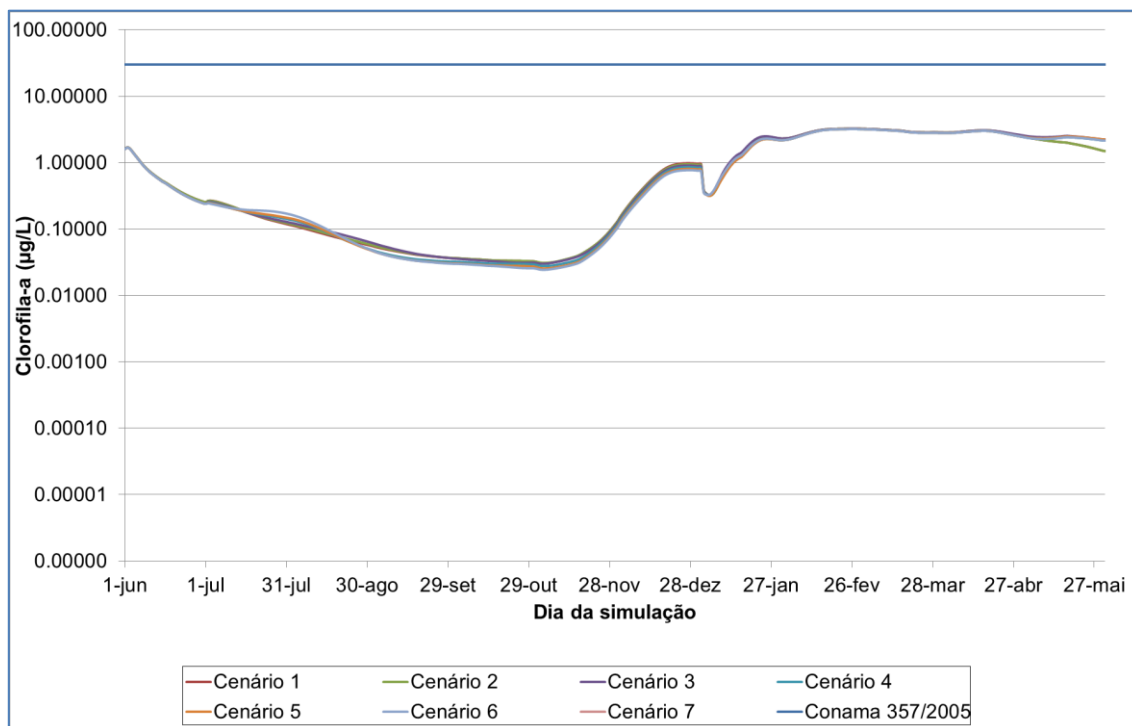


**Figura 264: Distribuição espacial das concentrações de Fósforo Total no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

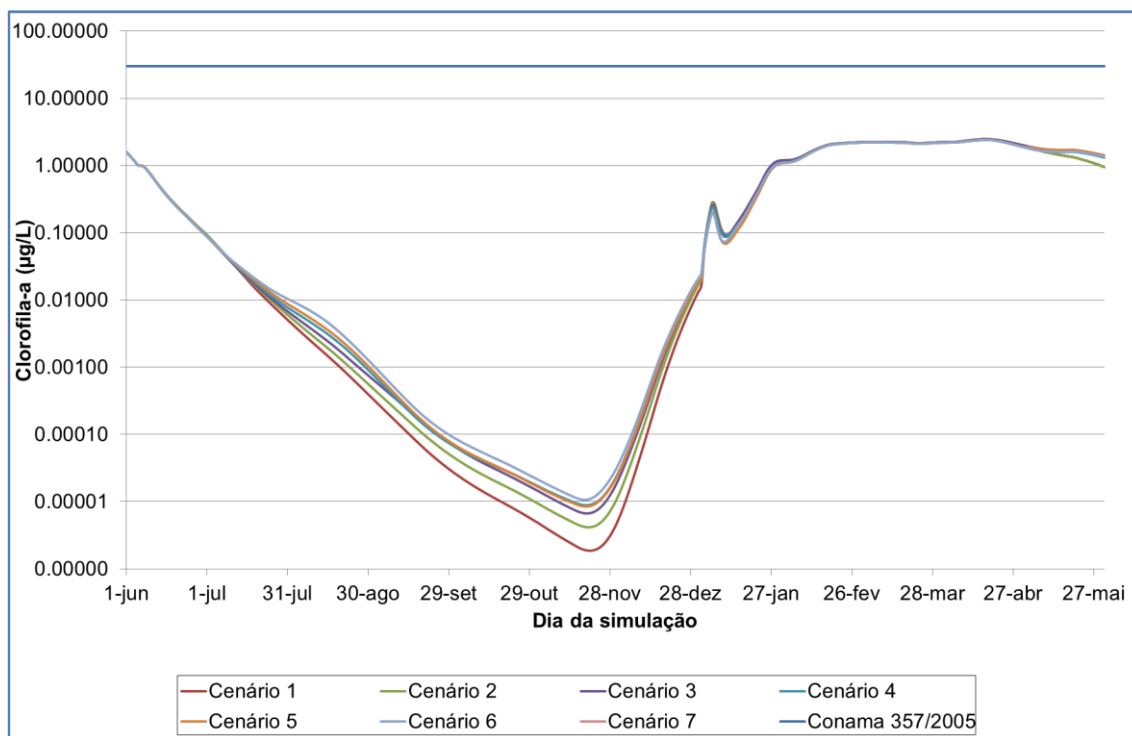
#### 6.4.6. Resultados para Clorofila-a

Para Clorofila-a, o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 é de 30,0 µg/L. Nas evoluções temporais para os pontos Est A e Est B, apresentadas na Figura 265 e na Figura 266, observa-se que as concentrações não ultrapassam 6,0 µg/L, valor bem abaixo do limite legal. As distribuições espaciais para o período de estiagem são apresentadas da Figura 267 até a Figura 273; as diferenças entre as distribuições espaciais das concentrações de Clorofila-a são bastante sutis, tanto em termos de espaço quanto em termos de amplitude. As maiores concentrações são observadas na região de entrada da afluência do TVR (montante) e devem-se à condição de contorno utilizada; concentrações menores são observadas na região a jusante da confluência das vazões turbinadas no RI com as vazões do TVR, e devem-se à diluição da Clorofila-a.

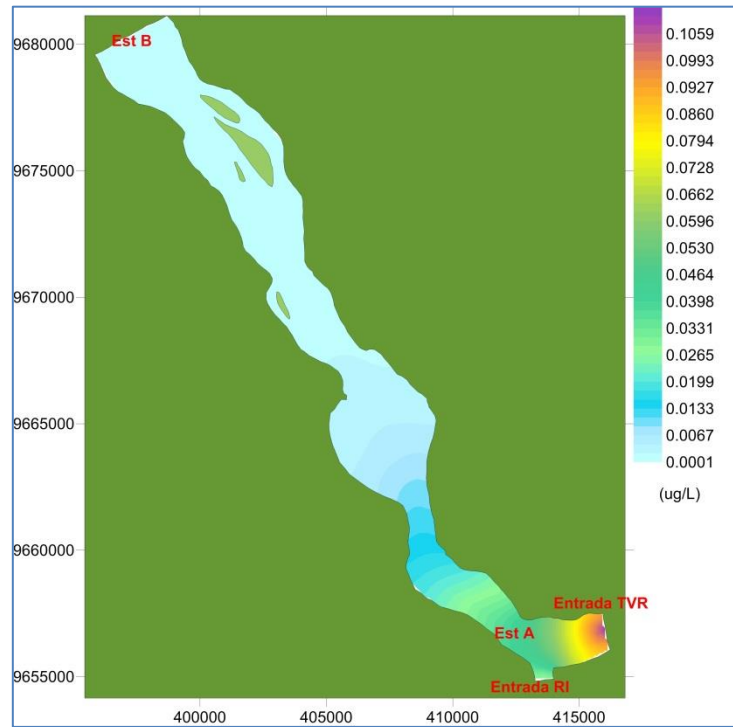




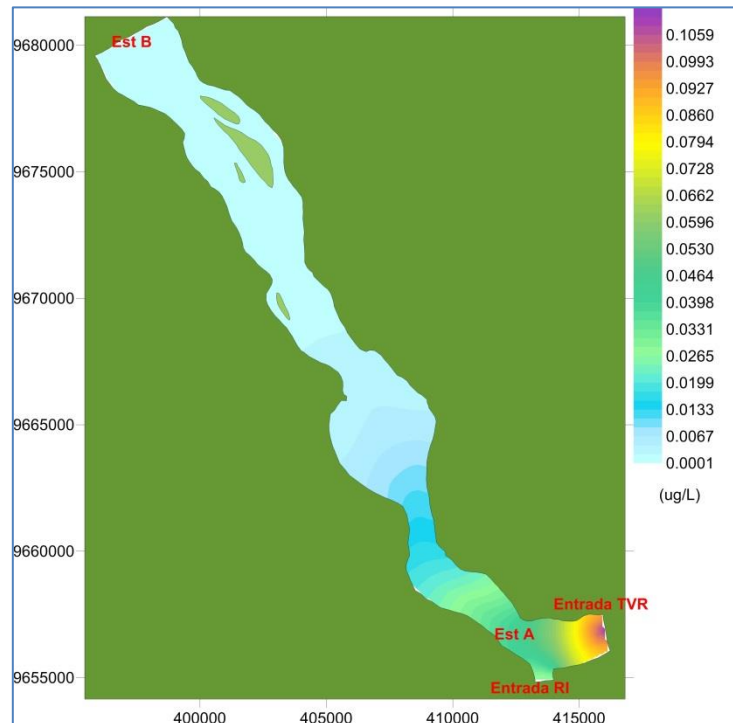
**Figura 265: Evolução temporal das concentrações de Clorofila-a (µg/L) no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão.**



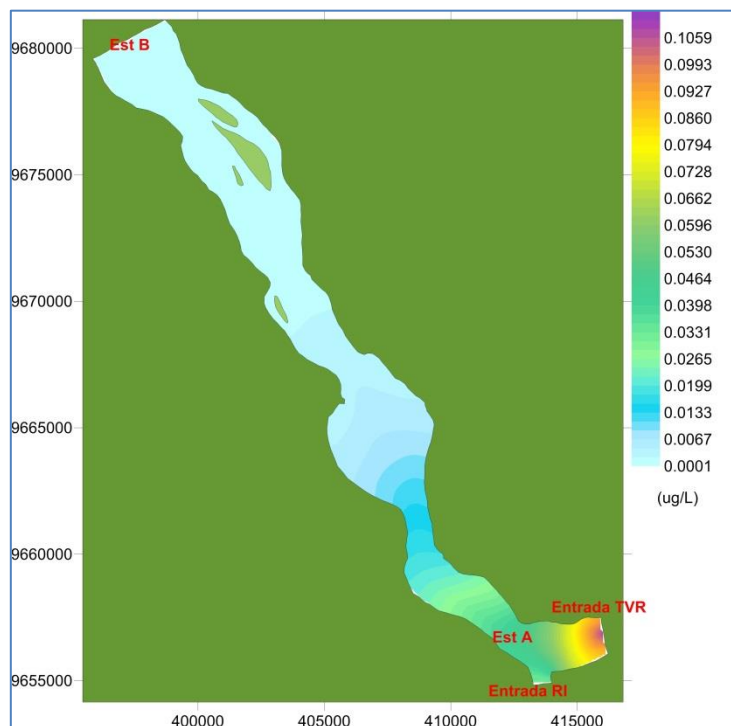
**Figura 266: Evolução temporal das concentrações de Clorofila-a (µg/L) no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão.**



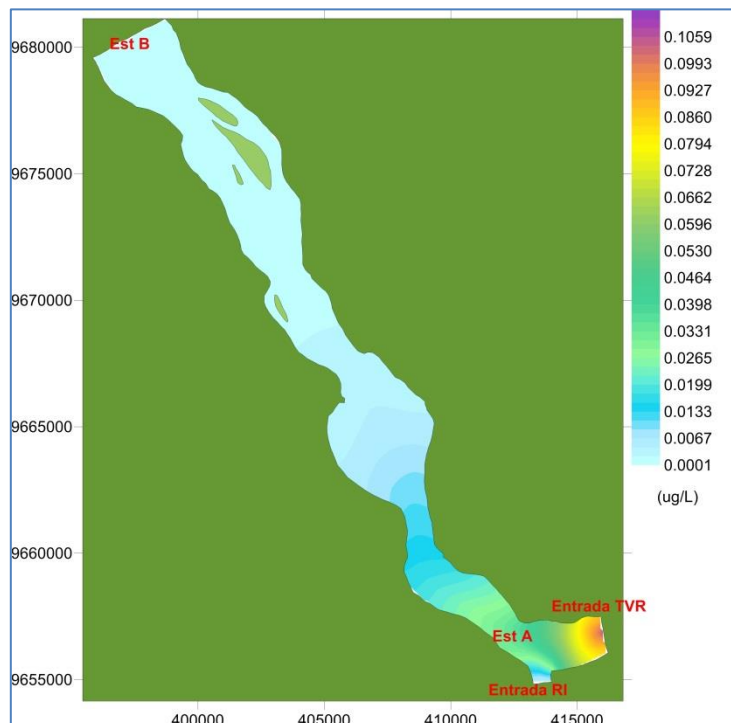
**Figura 267: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.**



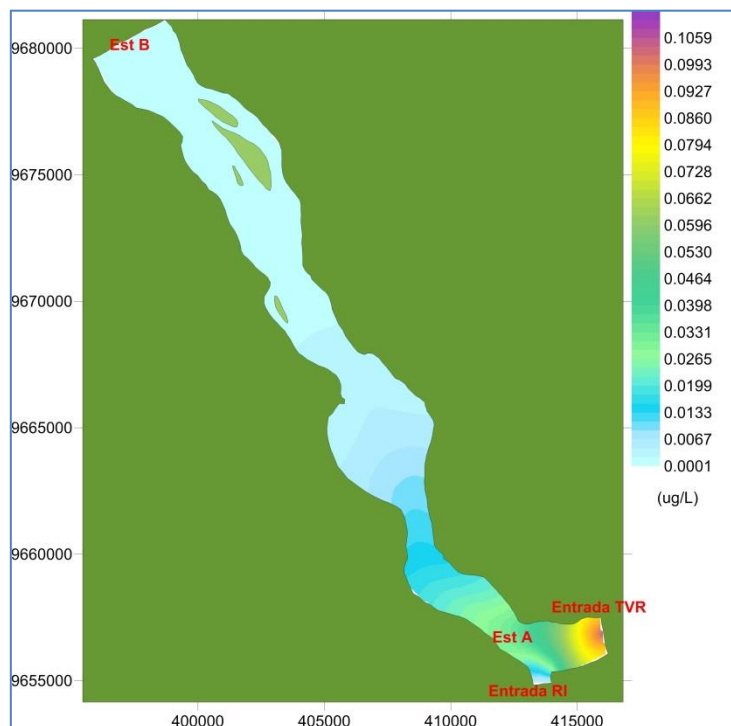
**Figura 268: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.**



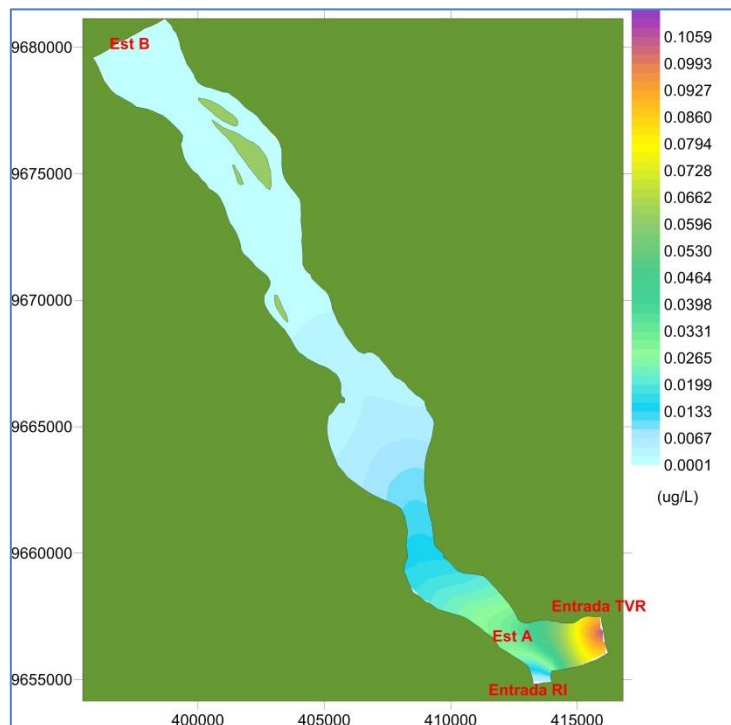
**Figura 269: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**



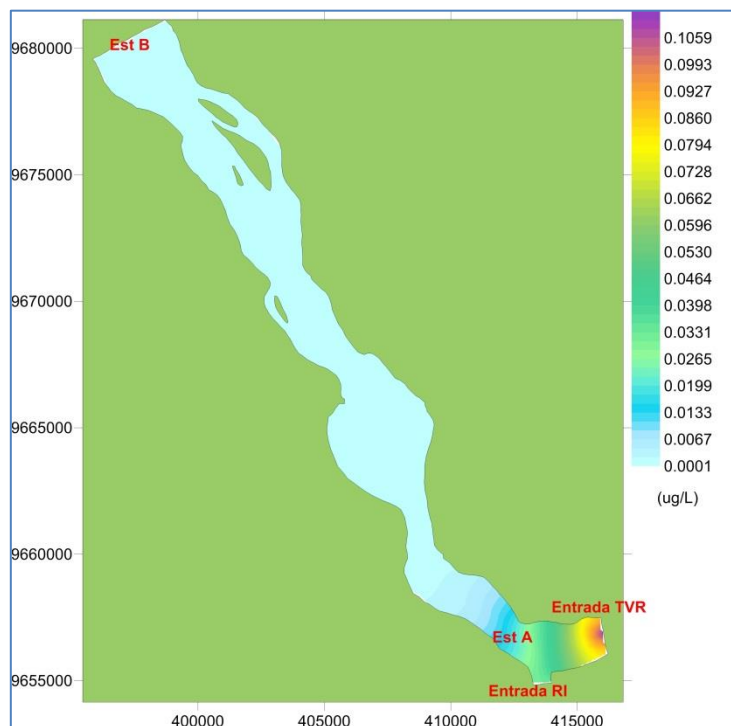
**Figura 270: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**



**Figura 271: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



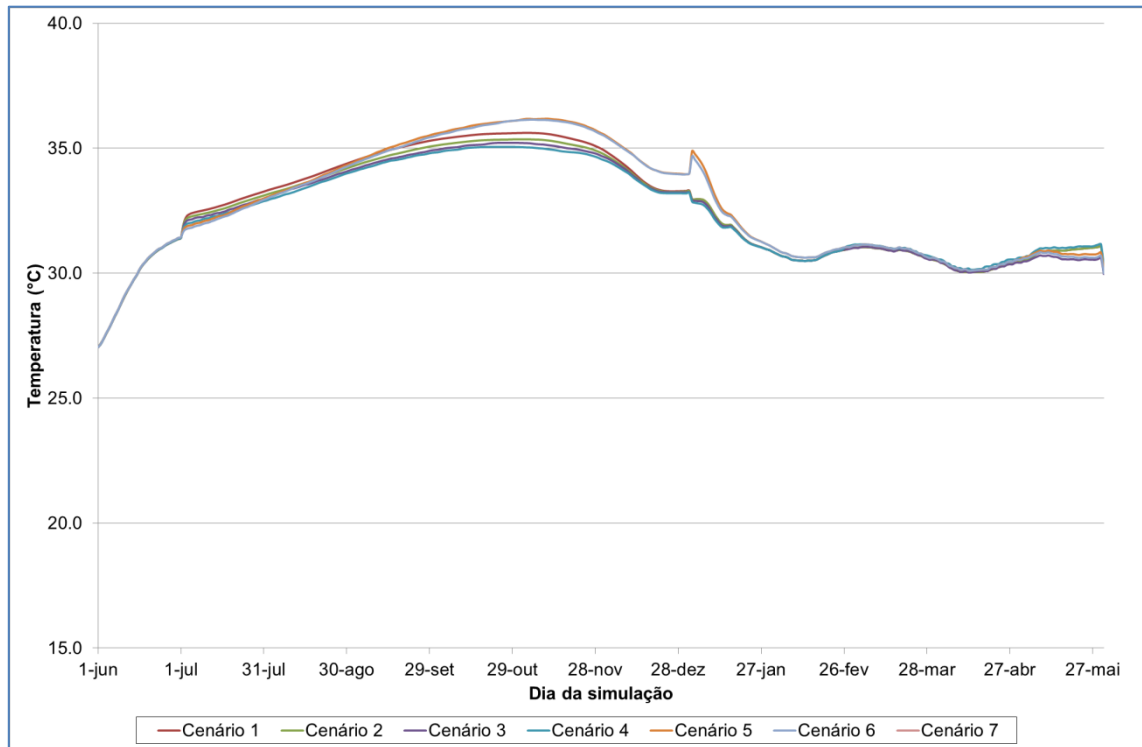
**Figura 272: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



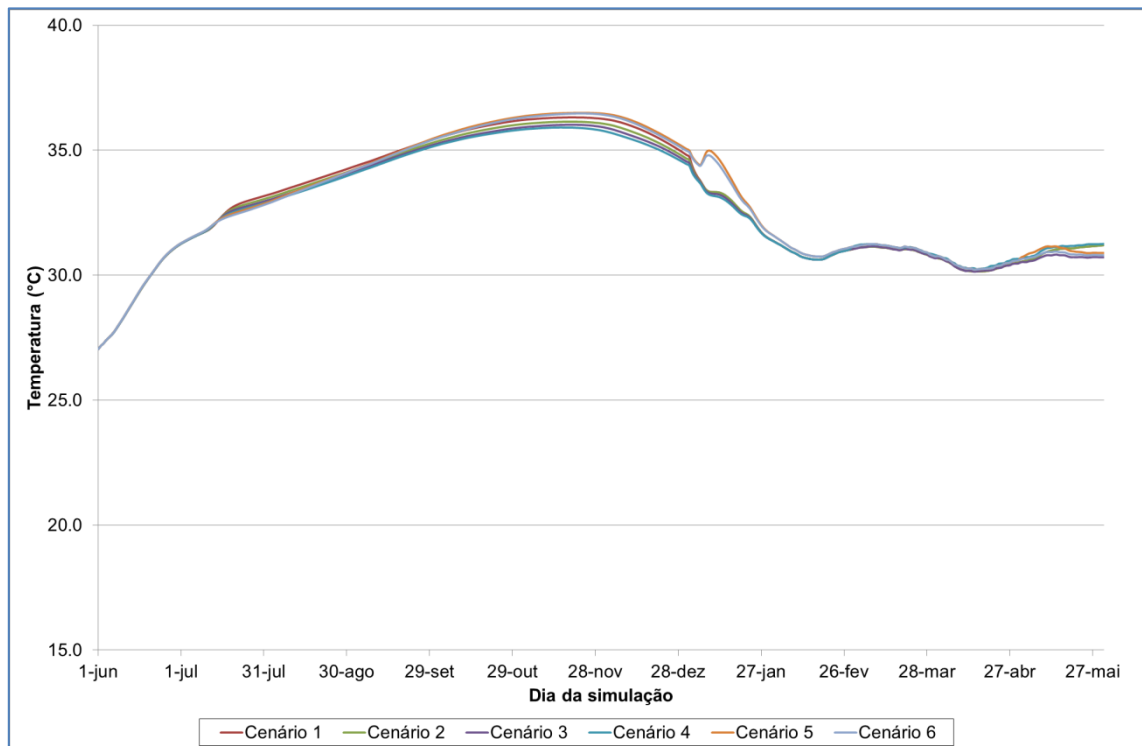
**Figura 273: Distribuição espacial das concentrações de Clorofila-a no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

#### 6.4.7. Resultados para Temperatura

Para as temperaturas, as séries temporais para os pontos Est A e Est B são apresentadas na Figura 274 e na Figura 275 respectivamente. Em ambos os pontos a variação da temperatura fica entre 27,5°C e 36°C. Assim como para as outras variáveis, as distribuições espaciais para o período de estiagem são parecidas – estas são apresentadas da Figura 276 até a Figura 282. Temperaturas maiores são observadas no início do trecho de jusante, e podem ser atribuídas à condição de contorno utilizada – nesse ponto as temperaturas chegam a cerca de 35°C; ao longo do domínio do trecho simulado, as temperaturas diminuem.



**Figura 274: Evolução temporal da temperatura no ponto Est A, após a o ponto de restituição de vazão.**



**Figura 275: Evolução temporal da temperatura no ponto Est B, na saída do Trecho de Restituição de Vazão.**

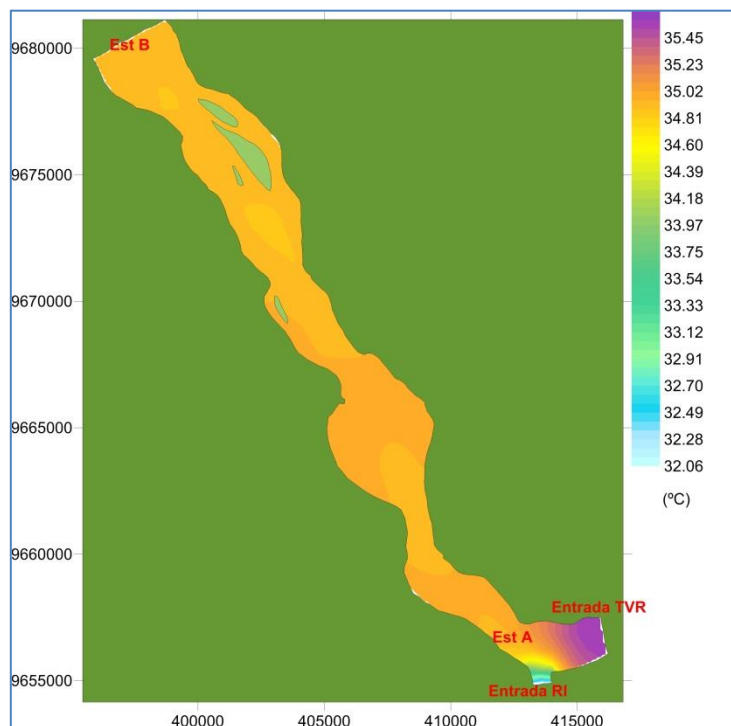


Figura 276: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 1.

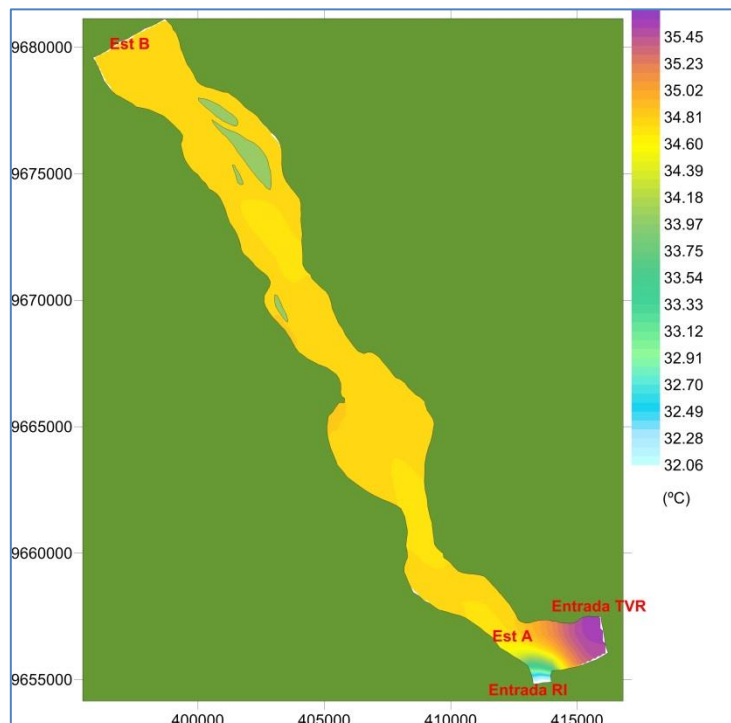
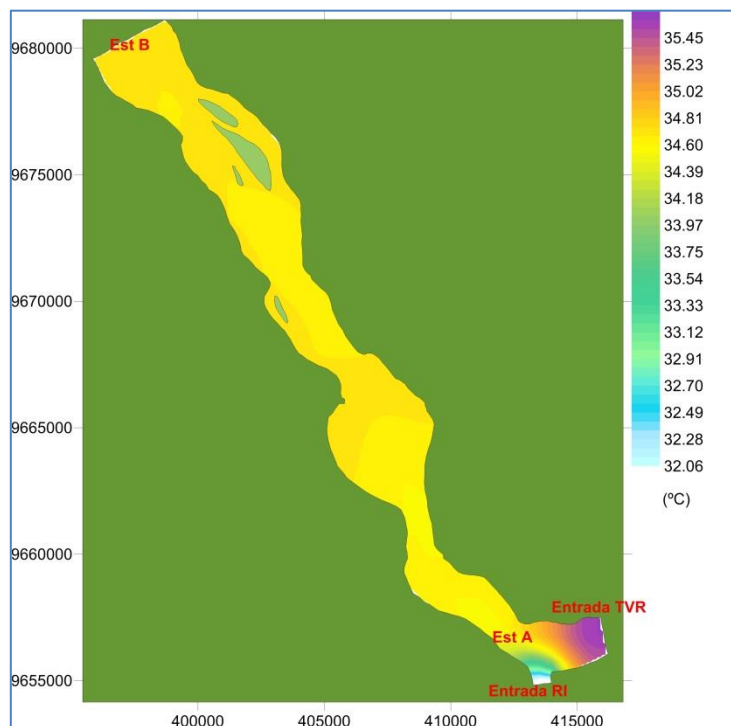
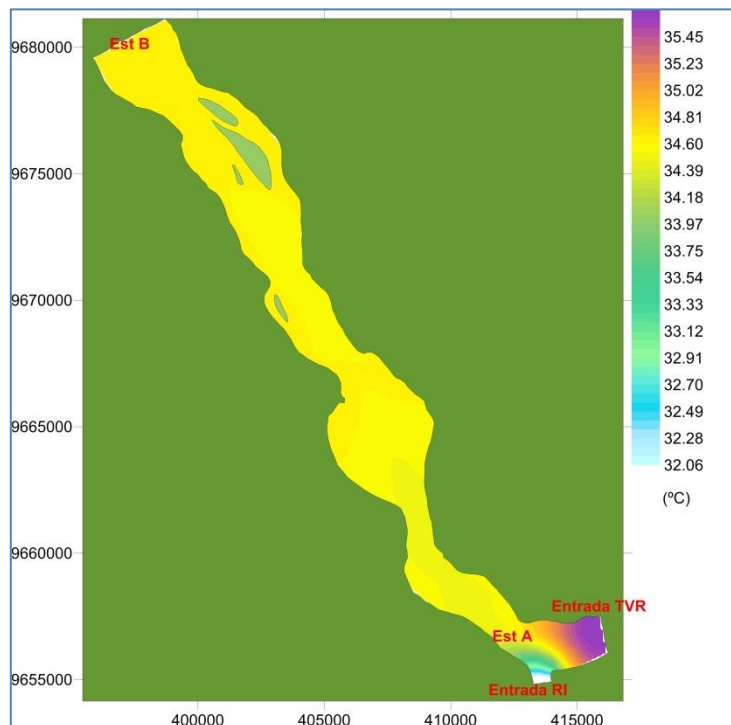


Figura 277: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 2.

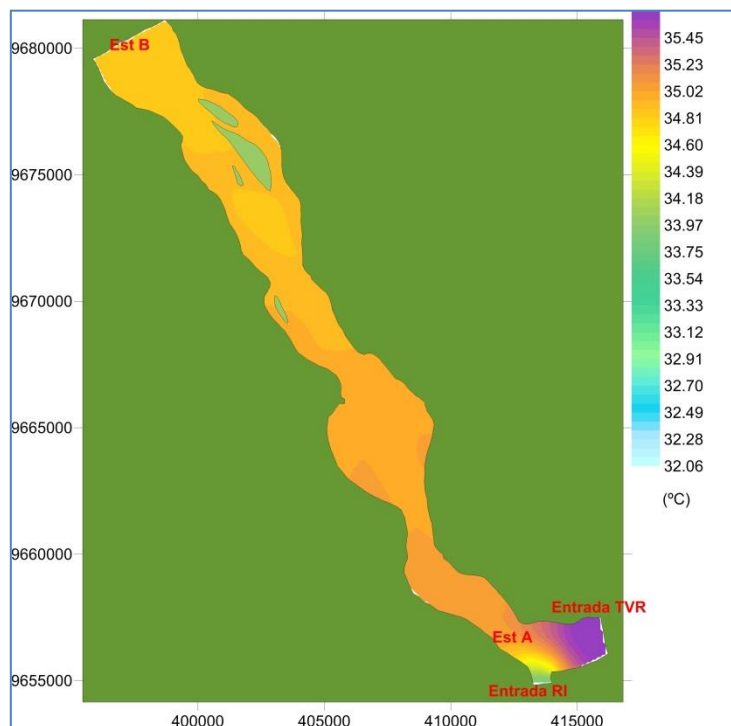


**Figura 278: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 3.**

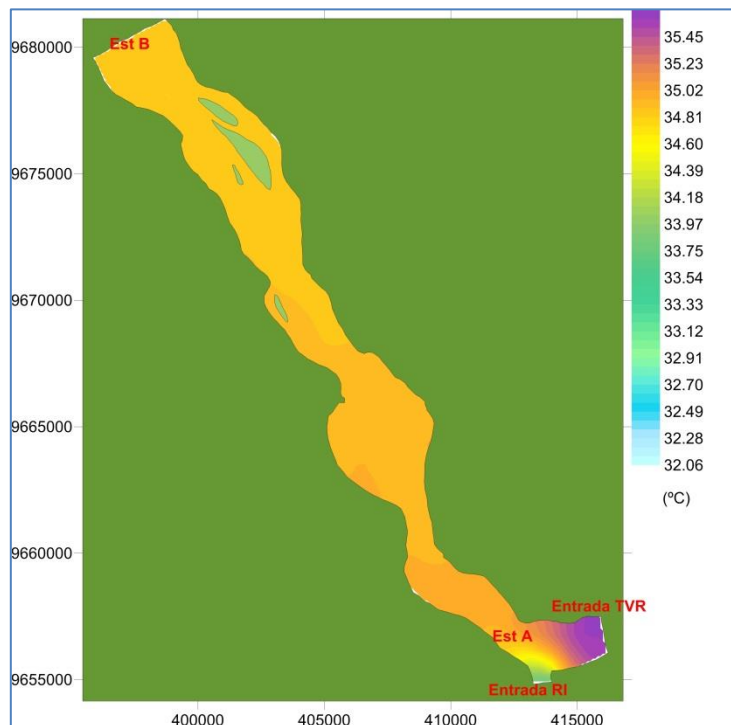


**Figura 279: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 4.**

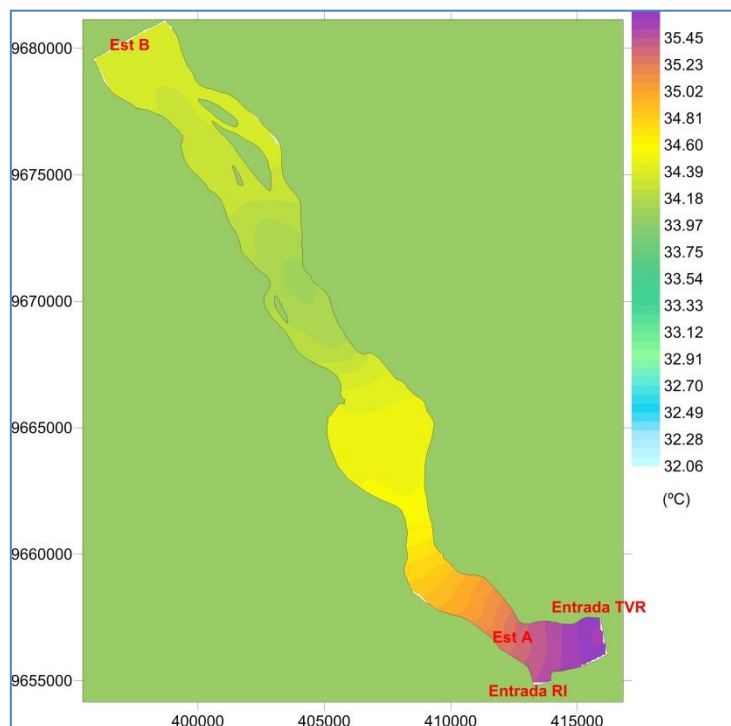




**Figura 280: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 5.**



**Figura 281: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 6.**



**Figura 282: Distribuição espacial das concentrações de Temperatura no período de estiagem (15 de setembro) – Cenário 7.**

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este documento apresentou os Estudos de Modelagem Matemática da Qualidade da Água do Reservatório Intermediário da UHE Belo Monte. Nesse contexto, modelagens matemáticas da hidrodinâmica e da qualidade da água do Reservatório do Xingu (RX), do Reservatório Intermediário (RI), e do Trecho de Restituição de Vazão (TRV) foram desenvolvidas no sentido de avaliar diferentes possibilidades de operação da UHE Belo Monte em períodos de estiagem. Para tanto, foram utilizados os modelos Delft3D® e SisBaHiA® - o primeiro para as simulações do Reservatório Intermediário, e o segundo para as simulações do Reservatório do Xingu e do Trecho de Restituição de Vazões.

Nesse contexto, foi feito o prognóstico do comportamento da qualidade das águas do Reservatório Intermediário, no período de estiagem, sujeito a diferentes vazões de alimentação do mesmo a partir do Reservatório Xingu por meio do Canal de Derivação – foi considerada a operação parcial das máquinas de Belo Monte operando em pulsos, com vazões de entrada variando de 50 em 50 m<sup>3</sup>/s, na faixa de 50 a 300 m<sup>3</sup>/s. Para tanto, foram utilizados dados históricos atualizados de intensidade e direção do vento, qualidade da água, e vazões, obtidos durante a execução do Projeto Básico Ambiental (PBA) da UHE Belo Monte. Além disso, foram apresentados resultados da modelagem hidrodinâmica e da qualidade da água do Reservatório do Xingu, do Reservatório Intermediário e do Trecho de Restituição de Vazão para o período crítico de estiagem, considerando diferentes vazões de turbinamento parcial das máquinas da Casa de Força Principal.

Em relação ao Reservatório do Xingu, considerando as baixas vazões do ano de 2016, e as médias históricas dos parâmetros de qualidade da água, além das diferentes vazões efluentes ao RI, não foram observadas alterações ou impactos significativos em termos de qualidade da água. Vale ressaltar que a calibração dos modelos já está prevista, de acordo com o que prevê o parágrafo 11 do artigo 1º da Resolução 48/2011 da Agência Nacional de Águas.

Da mesma forma, para o Trecho de Restituição de Vazões, também não foram observadas alterações significativas nos parâmetros. Nos dois casos, as concentrações das variáveis de interesse permaneceram sempre dentro dos limites, e com amplitudes de variação semelhantes.

A partir das simulações hidrodinâmicas do RI realizadas com base em uma série de cenários de vazões afluentes e turbinadas, representativas da operação em pulsos no reservatório intermediário observou-se que a forçante meteorológica, representada pelo campo de vento, provoca forte impacto nas camadas superficiais nos cenários intermediários - cenários 1 a 4 - que possuem as vazões operacionais mais baixas. Os cenários que possuem as vazões mais elevadas, Cenário 5 e Cenário 6, com valores médios de 250 e 300 m<sup>3</sup>/s apresentaram circulação uniforme ao longo de toda a coluna da água, principalmente no Canal de Derivação, onde a geometria força um deslocamento mais uniforme. No restante do RI, e em regiões mais rasas, o vento foi o fator determinante na circulação das massas de água.

Uma vez que não se observou diferenças significativas no padrão de circulação nos cenários com vazões mais reduzidas, na seção de discussão da hidrodinâmica do RI foram apresentados resultados dos dois cenários mais contrastantes. Com relação ao rebaixamento do nível d'água em função da operação por pulsos, observou-se que nos cenários iniciais, onde ocorre geração por períodos de duas e seis horas, o nível do reservatório reduz entre 3 e 7 cm. É importante observar que durante o primeiro mês da simulação, o nível do reservatório sofre uma redução de 10 cm, devido à perda de água pelos diques dos igarapés. Essa condição é observada em todos os cenários simulados. O dia 01 de junho é definido como o instante inicial das simulações, sendo que o período da operação por pulsos ocorre exatamente 30 dias após essa data. Com isso, no início do período da operação por pulsos, ou seja, 01 de julho, o sistema parte de uma condição em que o nível médio está a 96,9 m. Com isso, observa-se que ao final do processo da operação por pulsos, em 31 de dezembro, o reservatório se encontra 0,76 m mais baixo em todos os cenários. Ou seja, essa redução constante se deve simplesmente pela perda de água nos pontos de deflúvio nos igarapés, e também mostra que o volume de água do RI se recupera a cada dia, independente da operação realizada. É importante

lembrar que esses resultados foram obtidos considerando a condição inicial do nível do RI em 97,0 m.

Com relação às simulações de qualidade da água do RI, observou-se que nenhum dos parâmetros de qualidade fica fora dos padrões legalmente estabelecidos. Os maiores contrastes, entre os valores na superfície e no fundo, ocorrem no campo de temperatura, na área do Canal de Derivação. Nessa região observa-se diferenças de 3°C entre a camada superficial e a camada de fundo para o Cenário 1 e 4°C para o Cenário 6. Embora esse resultado possa indicar algum tipo de processo de estratificação, que poderia impactar nas concentrações de OD nas camadas de inferiores do RI, as diferenças das concentrações dessa substância (entre superfície e fundo) não são significativas.

Com base nos resultados gerados conclui-se que a operação por pulsos para o período de estiagem não gera evidências de baixos padrões de qualidade da água para nenhum dos parâmetros. Fatores como estratificação térmica, que poderiam isolar as camadas de águas mais profundas, impedido as trocas verticais e degradando a qualidade da água, não foram observados em nenhum dos cenários simulados.

Em síntese, as análises da modelagem da qualidade da água mostraram que a operação por pulsos, para um período de extrema estiagem, não provoca degradação da qualidade da água no Reservatório Intermediário. Os estudos realizados com base na evolução temporal dos parâmetros de qualidade, em pontos com diferentes características hidrodinâmicas também não evidenciaram a ocorrência de estratificações, tão pouco foram observadas alterações significativas de qualidade da água.

Cabe lembrar que a modelagem matemática é uma ferramenta de apoio à gestão, podendo subsidiar decisões de gerenciamento, o enquadramento dos cursos d'água em classes preponderantes de uso e a outorga dos direitos. Cenários podem ser propostos no sentido de simular diferentes intervenções; com isso é possível analisar, por exemplo, as características hidrodinâmicas do sistema e os indicadores de qualidade de água. Se uma mesma base é usada (domínio e variáveis iguais), é possível comparar alternativas

ou intervenções, mesmo que os resultados numéricos não sejam necessariamente exatos (Reckhow, 1994).

## REFERÊNCIAS

- ALDAMA, A. Theory and applications of two-and three-scale filtering approaches for turbulent flow simulation. Ph.D. Thesis, Dept. Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology. 1985.
- BEDFORD, K. W., BABAJIMOPOULOS, C. Vertical Diffusivities in a really averaged models. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. v.103 (EE1), pp.113-125. 1977.
- BEDFORD, K.. Diffusion, dispersion and sub-grid parameterization. Chapter 4 in "Coastal, Estuarial and Harbour Engineers' Reference Book", Ed. by M. B. Abbot and W. A. Price, E&FN Spon. 1994
- BOWIE, G.L., MILLS, W.B.; PORCELLA, D.B.; CAMPBELL, C.L.; PAGENKOPF, J.R.; RUPP, G.L.; JOHNSON, K.M.; CHAN, P.W.H.; GHERINI, S.A.; CHAMBERLIN, C.E. (1985) Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling. 2nd ed. Report nº EPA-600/3-85-040. USEPA.
- CHANUDET, V., FABRE, V., VAN DER KAAIJ, T.. Application of a three-dimensional hydrodynamic model to the Nam Theun 2 Reservoir (Lao PDR), J Great Lakes Res, 2012.
- CHAPRA, S. C.. Surface Water-Quality Modeling. McGraw-Hill. 1997.
- DAKE, J. M. K., HALERMAN, D. R. F. Thermal Stratification in Lakes: Analytical and Laboratory Studies. Water Resources Research. v.5(2). pp. 484-495. 1969.
- Deltares. "Delft3D Suite", Deltares, Holanda, Descrição geral do pacote na pagina: <http://www.deltares.com/hydro/product/621497/delft3d-suite>. 2013.
- Delft3D. " Delft3D Open Source Community", Deltares, Holanda, Local de obter o modelo e informações adicionais: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/home> . 2013.
- EDINGER, J.E., DUTTWEILER, D.W., GEYER, J.C., The Response of Water Temperatures to Meteorological Conditions. Water Resources Research. v.4 (5). pp. 1137-1143. 1968.
- FISCHER, H. B.. Mixing in Inland and Coastal Waters. Academic Press Inc., New York. 1979.
- FLOW. "Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments", User Manual Hydro-Morphodynamics, Version: 3.15, Deltares, Holanda. 2011
- GARCIA, G. E., Implementação de modelo numérico para avaliação do transporte de sedimentos no reservatório de Itaipu – PR". Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. 2008.
- GERRITSEN, H., GOEDE, E. D. de, PLATZEK, F. W., GENSEBERGER, M., KESTER, J. A. T. M. van, & UITTENBOGAARD, R. E. Validation Document Delft3D-FLOW -a software system for 3D flow simulations. 2007.
- HENDERSON-SELLERS, B. Development and Application of U.S.E.D: A Hydroclimate Lake Stratification Model. Ecological Modelling, v.21, pp.233-246. 1984.
- HENDERSON-SELLERS, B. New Formulation of eddy diffusion thermocline models. Applied Mathematical Modelling. v.9, pp.441-446. 1985.

- IMBERGER, J., PATTERSON, J.C., Physical Limnology. Advanced in Applied Mechanics. v. 27 pp. 303-475. 1989.
- LEME – AG/CCCC/ODEBRECHT. 2009. Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte. Volume 32. Avaliação de Impactos. Apêndice 10.2. Modelagem Matemática e Ecológica do AHE Belo Monte. 68 p.
- LEME – AG/CCCC/ODEBRECHT. 2010. Atendimento ao Ofício 1251/2009/DILIC/IBAMA Complementações Relativas à Qualidade da Água. 37 p.
- NEIBURGER, Morris; EDINGER, James G; BONNER, William D. Understanding our atmospheric environment. San Francisco: W.H. Freeman. 1973.
- Norte Energia. 2011. Modelagem Matemática da Qualidade da Água, 08 de abril de 2011. 136 p.
- Norte Energia. 2013a. CE 0169/2013 – DS. Modelagem Matemática de Qualidade da Água Durante o Enchimento do Reservatório do Xingu UHE Belo Monte, 10 de abril de 2013. 55 p.
- Norte Energia. 2013b. CE 0169/2013 – DS. Modelagem Matemática de Qualidade da Água Durante o Enchimento do Reservatório do Intermediário UHE Belo Monte, 10 de abril de 2013. 54 p.
- Norte Energia. 2013c. CE 0251/2013 – DS. Plano de Trabalho para o Monitoramento da Qualidade da Água e Simulações do Modelo Matemático do Sistema de Reservatórios da UHE Belo Monte, 14 de junho de 2013. 53 p.
- Norte Energia. 2013d. CE 0341/2013 – DS. Resposta ao ofício 02001.010054/2013-21 DILIC/IBAMA de 29 de Julho de 2013 – Complementação ao Plano de Trabalho para o Monitoramento da Qualidade da Água e Simulações do Modelo Matemático do Sistema de Reservatórios da UHE Belo Monte, 28 de agosto de 2013. 13 p.
- Norte Energia. 2013e. CE 386/2013 – DS. Modelagem Matemática de Qualidade da Água Durante o Enchimento do Reservatório do Xingu UHE Belo Monte, 26 de setembro de 2013. 102 p.
- Norte Energia. 2014. MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA UHE BELO MONTE - RIO XINGU/PA, junho de 2014. 321 p.
- Norte Energia. 2017, 12º Relatório Consolidado de Andamento do PBA e Atendimento de Condicionantes - UHE Belo Monte. RL-PR-001-806-020-31, Julho 2017.
- PAN Xiao-dong et al, 2009, "Research on the Numerical Simulation of Water Quality in Huadao Reservoir", Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009-21.
- PEREIRA, RS. Processos que regem a qualidade da água da Lagoa dos Patos, segundo o modelo Delft3D. p.149. Diss. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica)-Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2003.
- READ, J. S.; HAMILTON, D. P.; JONES, I. D.; MURAOKA, K.; WINSLOW, L. A.; KROISS, R.; WU, C. H.; GAISER, E. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. Environmental Modelling & Software, v; 26, pp.1325-1336, 2011.
- RECKHOW, K. H.. Water quality simulation modelling and uncertainty analysis for risk assessment and decision-making. Ecological Modelling 72: 1-20. 1994.
- Rosman, P. C. C.. Referência Técnica do SISBAHIA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL, Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil. 2017.



- ROSMAN, P.C.C.. Modeling Shallow Water Bodies via Filtering Techniques, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology. 1987.
- SCHLADOW, G., HAMILTON, D. (1987) Prediction of water quality in lakes and reservoirs; Part 1 – Model description. *Ecol. Model.* 96, p91–110.
- SHARIFI A., KALIN L., HANTUSHC M. M., ISIK S., JORDAN T. E.; Carbon dynamics and export from flooded wetlands: A modeling approach. *Ecological Modelling*, Volume 263, Pages 196–210. 2013.
- SMITS J., BODERIE P., VAN BEEK J.. Modelling of the Nam Theun 2 Reservoir: Water quality and greenhouse gases emissions. Relatório de Pesquisa Q4692.20. EDF, Centre d'Ingénierie Hydraulique, 2009.
- STEELE, J. H.. Notes on Some Theoretical Problems in Production Ecology. University of California Press. Berkeley, CA. 1965.
- STELLING, G. S., & VAN KESTER, J. A. T. M. (1994). On the approximation of horizontal gradients in sigma coordinates for bathymetry with steep bottom slopes. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 18, 915–955.
- STULL, R. B. *Meteorology for Scientists and Engineers*. 2 ed. Brooks/Cole. 2000.
- SUNDARAM, T. R., REHM, R. G. Formation and Maintenance of Thermoclines in Temperate Lakes. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. v.9(7), pp. 1322-1329. 1971.
- THOMANN, R. V. and MULLER, J. A.. *Principle of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper and Row, New York. 1987.
- WETZEL, R.G., *Limnology*. Saunders College Publishing. 2a ed. United States of America. 1983.
- WOOL, T.A., Ambrose, R.B., Nartin, J.L., Comer, E.A.. *Water Quality Analysis Simulation Program (WASP): Version 6.0 User's Manual*. USEPA. 2002.
- WÜEST, A., LORKE, A. Small-Scale Turbulence and Mixing: Energy Fluxes in Stratified Lakes. In: Likens, G. E. (Editor) *Encyclopedia of Inland Water*. Vol.1, pp-628-635 Oxford: Elsevier. 2009.