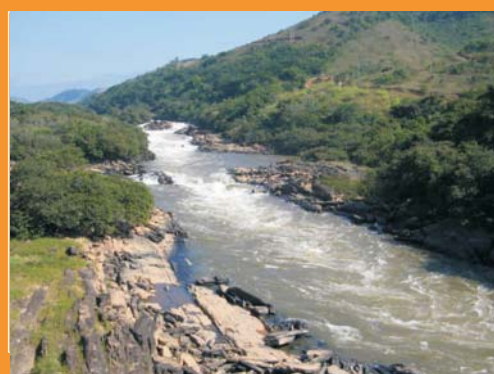
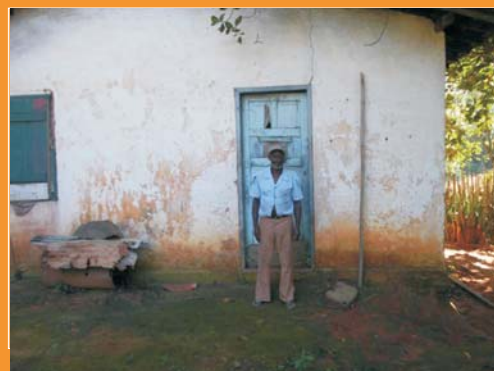


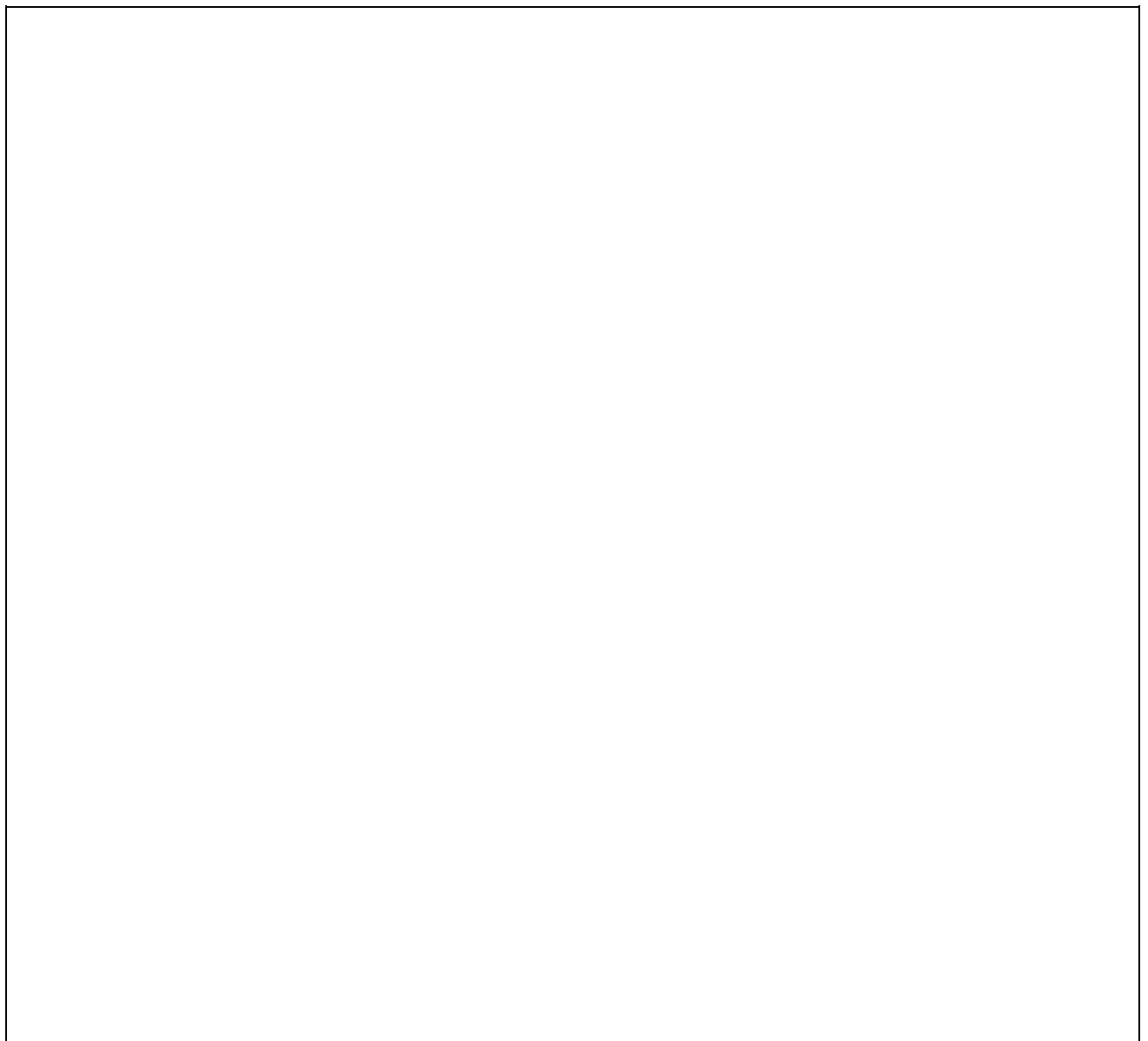
AHE SIMPLÍCIO QUEDA ÚNICA PROJETO BÁSICO AMBIENTAL





PROGRAMA DE MONITORAMENTO
DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS
Subprograma de Otimização da
Circulação das Águas nos Reservatórios

Novembro / 2006





0	13/11/2006	Emissão Final	EFG	RMdM	CGM/ SLFC
VER.	DATA	NATUREZA DA REVISÃO	ELAB.	VERIF.	APROV.
CLIENTE:					
					
EMPREENHIMENTO: AHE SIMPLÍCIO QUEDA ÚNICA – PROJETO BÁSICO AMBIENTAL					
ÁREA: MEIO AMBIENTE					
TÍTULO: PROGRAMA DE MONITORAMENTO DOS ECOSISTEMAS AQUÁTICOS SUBPROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO DA CIRCULAÇÃO DAS ÁGUAS NOS RESERVATÓRIOS					
ELAB. EFG		VERIF. RMdM		APROV. CGM/SLFC	
R. TEC.: JAS		CREA NO 5224-D			
CÓDIGO DOS DESCRITORES -- --			DATA 13/11/2006		Folha: 1
				De 101	
				Nº DO DOCUMENTO: 8922/01-60-RL-0830	
				REVISÃO 0	

ÍNDICE	PÁG.
1 - JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS	0830-3
2 - METODOLOGIA	0830-4
2.1 - Descrição dos Dados	0830-4
2.1.1 - Dados de Contorno e Batimetria	0830-4
2.1.2 - Dados Hidrológicos	0830-8
2.1.3 - Dados de Qualidade da Água	0830-11
2.2 - Metodologia da Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade de Água	0830-12
2.2.1 - Caracterização da Hidrodinâmica	0830-12
2.2.2 - Modelagem Hidrodinâmica.....	0830-12
2.2.3 - Modelagem Numérica da Qualidade da Água do Reservatório.....	0830-15
2.2.4 - O Modelo de Qualidade de Água	0830-16
2.3 - Cenários de Modelagem Hidrodinâmica	0830-25
2.3.1 - Configuração Hidrológica do Cenário de Cheia	0830-25
2.3.2 - Configuração Hidrológica do Cenário de Estiagem.....	0830-26
2.3.3 - Reservatório de Anta.....	0830-26
2.3.4 - Reservatório de Tocaia	0830-32
2.3.5 - Reservatório de Lourical.....	0830-37
2.3.6 - Reservatório de Calçado	0830-48
2.3.7 - Reservatórios de Antonina e Peixe	0830-51
2.4 - Cenários de Modelagem da Qualidade da Água.....	0830-56
2.4.1 - Reservatório de Anta.....	0830-57
2.4.2 - Reservatório de Tocaia	0830-65
2.4.3 - Reservatório de Lourical.....	0830-71
2.4.4 - Reservatório de Calçado	0830-81
2.4.5 - Reservatórios de Antonina e Peixe	0830-89
2.5 - Conclusões	0830-95
3 - PRINCIPAIS ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS	0830-97
4 - RESPONSÁVEL PELA EXECUÇÃO.....	0830-98
5 - CRONOGRAMA FÍSICO.....	0830-99
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	0830-100

1 - JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

De forma a melhor organizar as atividades previstas no EIA, juntamente com as condicionantes da LP 217/2005, o *Programa de Monitoramento dos Ecossistemas Aquáticos* foi reagrupado nos três subprogramas abaixo:

- *Subprograma de Monitoramento Limnológico e da Qualidade da Água.* Aqui foram agrupados quatro subprogramas previstos no EIA (Monitoramento da Qualidade da Água, Monitoramento da Comunidade Fitoplanctônica, Monitoramento da Comunidade Zooplanctônica e Monitoramento da Macrofauna Bêntica), uma vez que: possuem objetivos similares; os monitoramentos serão realizados nas mesmas estações de amostragens; e a análise dos dados deverá ser integrada para os quatro temas;
- *Subprograma de Acompanhamento da Proliferação e Reaproveitamento de Macrófitas Aquáticas.* As atividades que envolvem as macrófitas, apesar de relacionadas com os parâmetros limnológicos e da qualidade da água, exige ações específicas;
- *Subprograma de Otimização da Circulação das Águas nos Reservatórios.* Esse subprograma não foi previsto no EIA, mas aqui recebeu esse *status* devido às particularidades das atividades previstas e à sua importância para a manutenção da qualidade da água.

O presente Subprograma se constitui na continuidade e detalhamento do estudo de indicação das possíveis soluções de engenharia que melhorem a circulação das águas nos braços dos reservatórios de menor circulação do AHE Simplício Queda Única, ou simplesmente AHE Simplício, contido no relatório 8794/00-6B-RL-0004-0, de setembro/2005.

Do mesmo modo que o estudo anterior, foram utilizadas modelagens numéricas hidrodinâmicas e de qualidade da água para o diagnóstico das regiões de baixa circulação nos reservatórios de Anta, Tocaia, Louriçal, Calçado, Antonina e Peixe, para a proposição das alternativas de engenharia mais eficazes na recirculação hidrodinâmica.

Visando atender os objetivos acima apresentados, este Subprograma está estruturado da seguinte forma:

- descrição dos dados necessários às modelagens numéricas. São eles: dados de qualidade das águas dos rios Paraíba do Sul e seus afluentes principais, de hidrologia, batimétricos e de contorno;
- modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água, onde é apresentada a fundamentação teórica dos modelos numéricos utilizados nas simulações;
- simulações hidrodinâmicas, onde são apresentadas as implementações do modelo numérico hidrodinâmico Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBAHIA. São apresentados ainda os resultados dos campos de velocidades obtidos com as simulações dos cenários de vazão máxima e mínima;

- simulações de qualidade da água, onde são apresentados os resultados obtidos com as simulações numéricas das variáveis Fósforo, Amônia, Nitrogênio, Oxigênio Dissolvido – OD e Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO. Os campos de corrente necessários para a realização das simulações numéricas da qualidade da água foram obtidos das simulações numéricas hidrodinâmicas.

Na elaboração deste Subprograma buscou-se, portanto, atender às seguintes condicionantes apresentadas na Licença Prévia (LP) nº 217/2005, emitida pelo IBAMA:

“2.22 – Aprimorar as alternativas de mudanças estruturais para eliminação da circulação horizontal nos braços dos reservatórios Anta, Tocaia e Lourical, indicando a configuração ideal do defletor e o melhor posicionamento dos diques”;

“2.23 – Detalhar no PBA as medidas de engenharia a serem adotadas para otimizar a circulação das águas nos reservatórios Anta, Tocaia e Lourical (como implantação de defletores, diques e mecanismos de descargas de fundo e superfície), bem como as ações de controle, objetivando a redução do risco de eutrofização”.

2 - METODOLOGIA

2.1 - Descrição dos Dados

Neste item são apresentadas a modelagem hidrodinâmica e de qualidade da água dos reservatórios que compõem o complexo de geração do aproveitamento hidrelétrico Simplício, com uma avaliação das condições futuras de circulação e de qualidade da água nesses reservatórios.

São apresentados e descritos os dados de contorno, batimetria, hidrológicos, meteorológicos, de qualidade da água e de fontes de poluição dos reservatórios que constituem o AHE Simplício.

2.1.1 - Dados de Contorno e Batimetria

Para a execução dos modelos hidrodinâmico e de qualidade de água, se faz necessária a definição de um domínio dentro do qual as equações matemáticas serão resolvidas. Para a execução do trabalho de modelagem, tanto os dados de batimetria quanto os de contorno foram obtidos de mapas em formato *CAD* da cartografia disponível.

A Figura 2.1 apresenta o arranjo geral dos reservatórios analisados na modelagem e que compõem o complexo de geração do AHE Simplício.

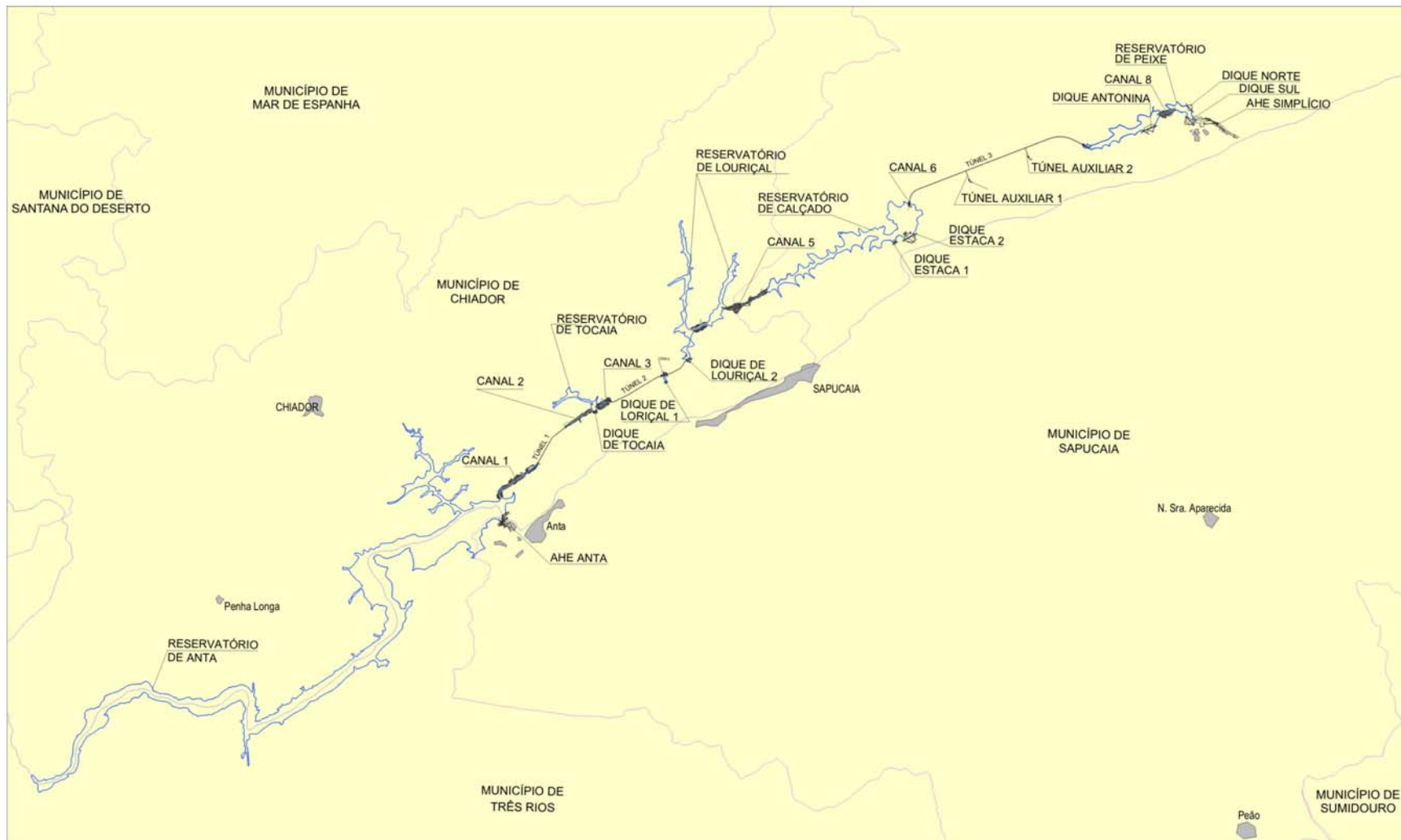


FIGURA 2.1
ARRANJO GERAL DOS RESERVATÓRIOS ANALISADOS NA MODELAGEM

As Figuras 2.2, 2.4, e 2.5 mostram, respectivamente, o domínio para os reservatórios de Anta, Louriçal e Calçado. Para o reservatório Tocaia, o domínio da modelagem (Figura 2.3) foi simplificado quando comparado ao contorno real do reservatório por dificuldades na modelagem hidrodinâmica, como será explicado no item 2.3.4. A Figura 2.6 mostra os reservatórios de Antonina e Peixe. Os modelos foram implementados de forma conjunta nesses dois reservatórios devido à proximidade entre os dois.

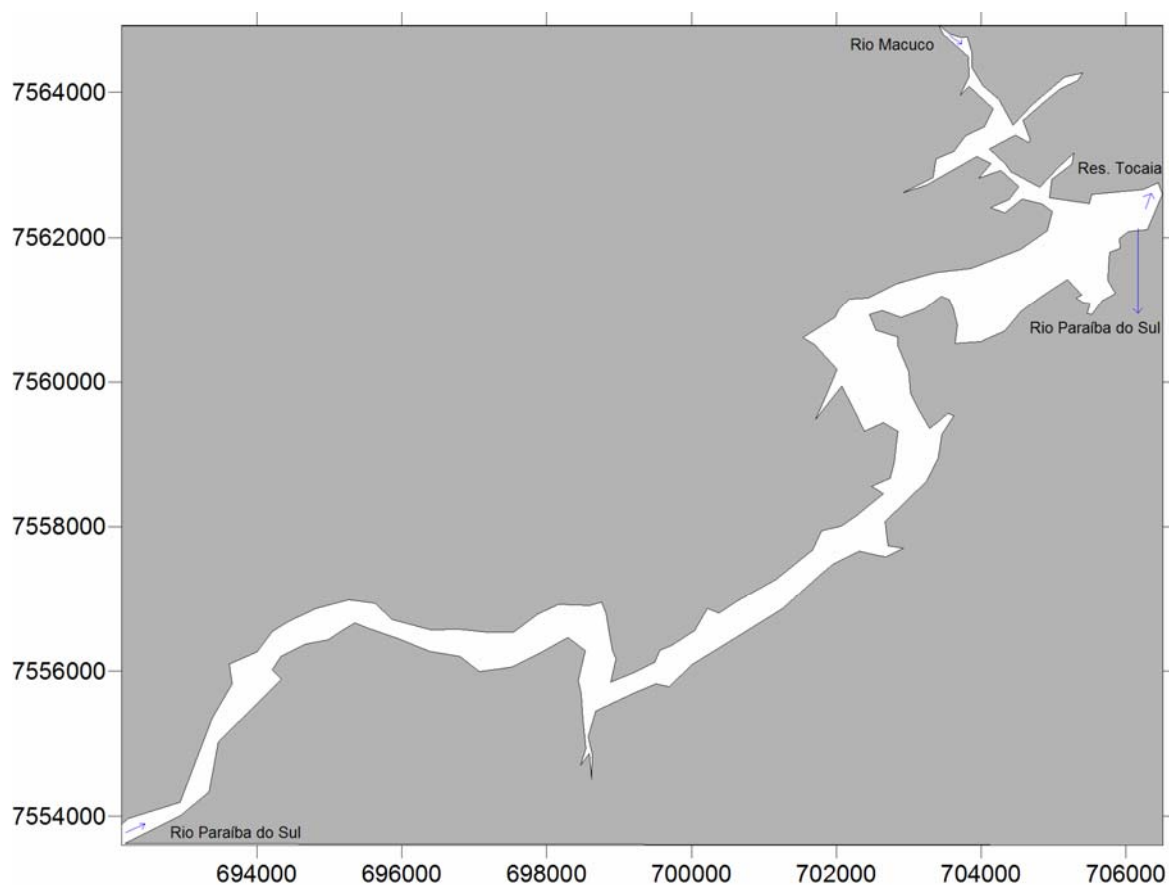


FIGURA 2.2
CONTORNO DO RESERVATÓRIO DE ANTA

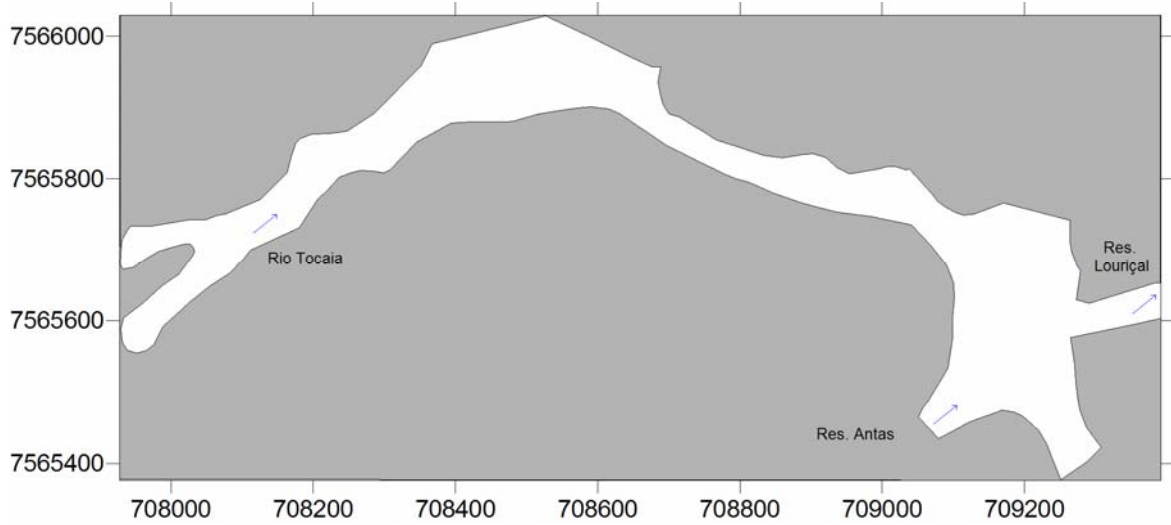


FIGURA 2.3
CONTORNO DO RESERVATÓRIO TOCAIA

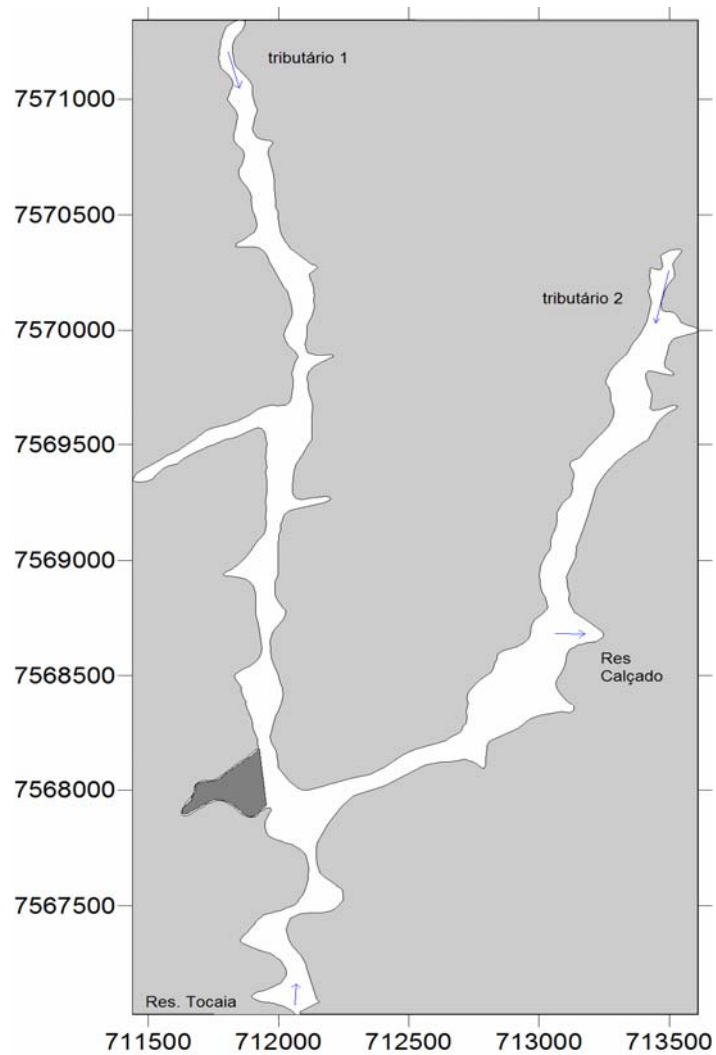


FIGURA 2.4
CONTORNO DO RESERVATÓRIO LOURÇAL

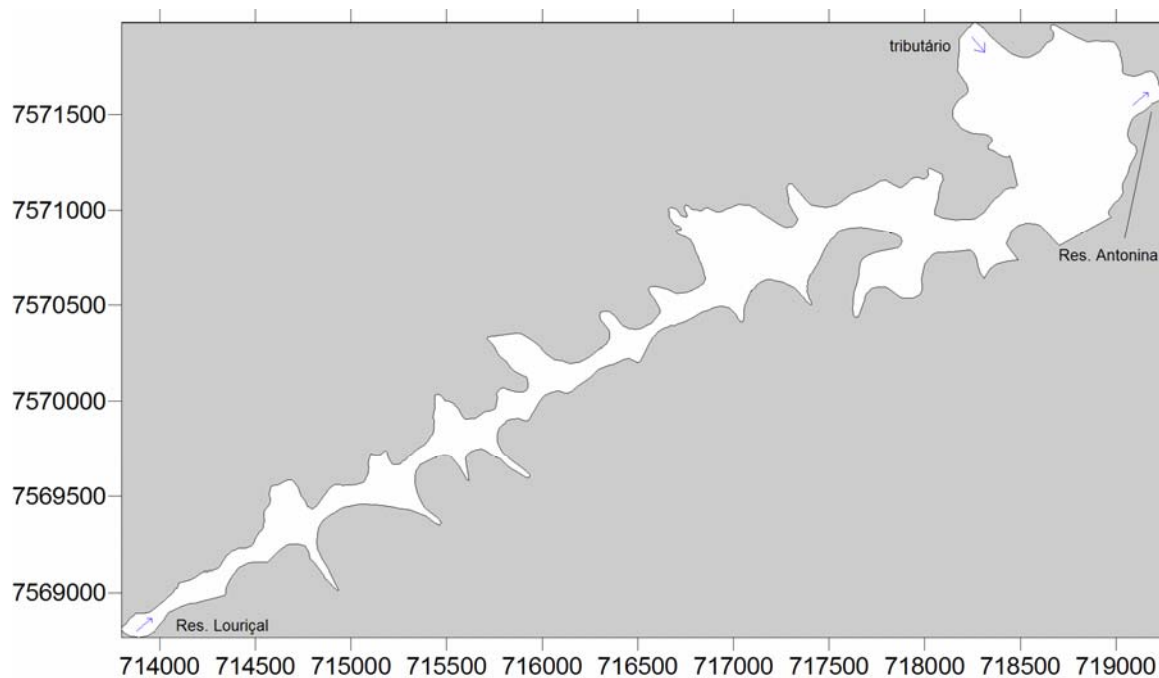


FIGURA 2.5
CONTORNO DO RESERVATÓRIO CALÇADO

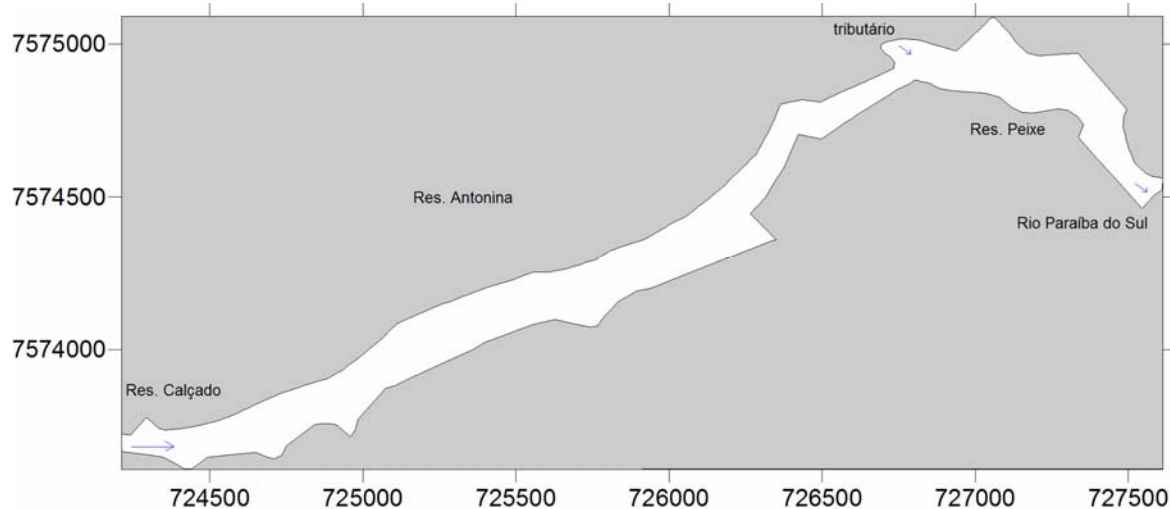


FIGURA 2.6
CONTORNO DOS RESERVATÓRIOS ANTONINA E PEIXE

2.1.2 - Dados Hidrológicos

Neste estudo foi utilizada a série de vazões regularizadas, no período de 1931 a 2001, definida pela Agência Nacional de Águas – ANA, e utilizada pela Empresa de Planejamento Energético – EPE, para cálculo de energia assegurada do AHE Simplício, apresentada na Tabela 2.1.

TABELA 2.1
VAZÕES MÉDIAS MENSAIS DO RIO PARAÍBA DO SUL EM ANTA

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média
1931	792,10	1814,80	1332,60	849,60	419,70	276,30	188,40	154,50	163,40	233,30	257,40	609,90	591,00
1932	1089,80	955,90	883,60	394,60	315,70	274,10	127,40	118,50	114,40	144,30	234,60	724,00	448,08
1933	961,60	473,30	422,30	227,50	191,70	148,20	142,50	98,50	111,40	181,30	214,60	525,10	308,17
1934	959,20	380,30	437,30	232,00	151,70	117,20	94,50	75,60	81,50	90,30	100,60	410,30	260,88
1935	573,10	1366,80	728,70	431,50	223,40	169,10	132,40	106,50	106,40	176,30	153,60	166,70	361,21
1936	136,80	265,60	1147,40	574,90	223,90	119,10	86,40	76,50	100,40	108,30	143,60	390,40	281,11
1937	869,60	962,80	453,90	376,40	350,00	161,10	117,40	86,50	78,50	175,30	269,50	939,60	403,38
1938	893,20	820,30	736,70	482,40	292,60	193,10	152,40	159,50	130,40	212,90	335,00	579,30	415,65
1939	752,80	695,40	428,20	448,50	203,70	141,10	110,40	86,50	83,40	90,30	163,60	288,60	291,04
1940	652,50	974,60	817,10	324,10	185,50	147,10	113,50	88,60	91,50	134,30	309,50	375,70	351,17
1941	438,60	274,80	382,30	264,70	169,80	136,20	126,50	90,60	156,40	153,30	227,60	511,70	244,38
1942	559,50	486,30	755,70	409,30	234,50	169,10	158,40	110,60	96,50	157,30	245,60	560,80	328,63
1943	1276,30	1,009,50	781,90	387,60	228,70	192,10	144,40	130,50	121,50	214,30	205,60	452,40	428,73
1944	405,60	913,60	1094,10	440,30	228,60	157,10	138,50	108,60	97,50	113,40	133,60	251,50	340,20
1945	449,40	823,10	513,50	438,10	181,70	161,10	153,20	101,50	102,50	95,30	175,60	415,60	300,88
1946	1147,90	478,40	603,80	352,00	183,70	152,10	124,40	92,60	79,50	124,30	180,60	200,70	310,00
1947	697,70	1045,30	1850,80	741,90	372,80	205,90	239,60	191,50	155,40	190,30	320,90	679,30	557,62
1948	628,70	871,30	1090,30	531,80	277,10	188,00	117,40	109,50	96,40	108,30	174,60	394,40	382,32
1949	718,80	979,90	533,00	300,00	156,70	154,10	127,40	105,60	90,50	134,30	159,60	292,70	312,72
1950	915,40	1231,50	774,80	628,60	382,10	180,30	126,40	97,50	92,50	117,30	255,60	588,50	449,21
1951	683,00	812,90	956,70	658,10	288,10	164,80	139,40	120,60	98,50	109,30	102,60	233,70	363,98
1952	651,20	945,50	1157,10	496,50	233,70	214,20	165,40	125,60	136,40	147,30	280,60	369,60	410,26
1953	229,80	295,80	275,80	274,40	188,70	145,20	116,50	92,80	99,50	94,30	215,60	291,70	193,34
1954	176,80	229,90	173,80	179,50	166,20	108,10	74,50	61,60	59,50	77,30	113,60	173,70	132,88
1955	406,30	195,80	171,80	182,50	123,80	107,20	73,60	58,80	49,70	76,60	138,80	312,70	158,13
1956	282,80	195,80	295,30	175,50	140,70	127,10	103,50	94,50	83,60	90,50	132,80	332,70	171,23
1957	303,70	353,40	830,20	735,20	245,50	174,10	144,40	104,50	120,40	113,30	172,60	367,70	305,42
1958	212,80	389,60	439,50	293,60	284,10	180,00	129,40	95,50	116,40	153,30	241,60	397,70	244,46
1959	840,50	331,60	640,10	471,90	166,70	129,10	105,50	108,50	82,40	109,30	269,50	233,70	290,73
1960	319,80	602,90	1132,20	364,20	230,70	183,10	147,50	127,50	109,50	121,30	145,60	338,40	318,56
1961	1283,30	1299,90	1323,60	620,60	382,80	225,10	174,40	135,50	98,40	102,30	144,60	221,70	501,02
1962	437,40	1287,50	723,40	333,10	186,70	151,10	120,50	97,60	114,40	145,30	257,50	497,00	362,63
1963	581,80	623,60	389,20	161,50	128,70	111,20	95,50	81,60	67,70	80,30	141,60	98,70	213,45
1964	294,70	672,60	326,70	199,50	157,70	120,20	126,50	91,60	80,60	147,50	187,80	309,70	226,26
1965	667,80	1182,60	848,40	365,70	372,90	238,10	195,40	162,50	133,50	217,30	291,60	395,20	422,58
1966	1419,20	498,20	834,80	478,30	267,50	192,10	150,40	125,50	114,40	174,30	535,90	662,80	454,45
1967	1533,60	1593,80	1399,90	734,40	360,00	256,90	188,40	148,50	134,40	133,30	295,60	523,30	608,51
1968	613,80	333,60	432,00	229,80	140,70	112,20	96,50	94,70	102,50	115,30	97,60	242,70	217,62
1969	403,70	285,40	378,60	248,80	143,70	139,10	111,50	103,60	91,50	147,30	246,50	429,70	227,45
1970	439,40	391,40	437,40	188,50	139,70	106,10	112,40	89,50	145,40	154,30	182,60	190,70	214,78
1971	200,80	101,00	218,60	134,30	109,50	106,10	71,50	62,60	84,40	125,30	253,60	491,80	163,29
1972	452,50	670,70	764,70	342,80	170,70	151,10	133,40	114,50	87,60	182,30	262,60	364,70	308,13
1973	663,00	785,50	404,80	407,10	227,50	170,10	145,40	119,50	109,40	166,30	327,60	439,40	330,47
1974	575,80	432,60	611,50	449,60	206,70	180,10	145,40	111,60	94,50	139,30	133,60	327,00	283,98
1975	664,20	678,30	487,60	251,40	160,70	122,10	118,50	91,60	82,50	154,30	290,20	327,10	285,71
1976	432,10	475,00	501,60	357,50	228,80	253,90	250,80	171,30	236,40	308,20	397,60	605,90	351,59

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média
1977	744,60	484,80	252,80	343,80	171,70	133,10	108,40	80,60	117,40	101,30	222,60	510,00	272,59
1978	875,80	501,90	533,20	228,30	172,70	154,10	120,40	97,50	86,40	98,50	190,60	225,70	273,76
1979	318,30	1017,30	540,50	283,30	222,70	184,20	149,40	133,50	152,40	121,30	265,60	406,30	316,23
1980	712,40	512,20	326,40	438,00	172,70	144,10	122,40	104,50	96,40	122,30	179,60	388,90	276,66
1981	792,80	456,50	377,30	269,90	162,70	135,10	103,50	84,60	74,50	132,30	254,50	553,30	283,08
1982	720,00	431,90	1014,30	642,80	265,40	209,10	166,40	153,50	99,40	153,30	181,60	672,20	392,49
1983	1219,40	840,90	806,40	647,20	379,70	946,10	391,80	230,50	624,70	594,40	664,80	935,20	690,09
1984	733,20	363,50	319,90	347,70	335,50	184,10	136,40	119,50	122,40	121,30	141,60	226,70	262,65
1985	856,00	1237,20	1192,00	542,30	331,60	243,10	175,40	142,50	139,40	144,30	187,50	302,70	457,83
1986	487,40	613,80	729,90	294,20	182,70	136,10	130,40	114,50	90,40	76,50	80,60	491,80	285,69
1987	598,20	688,80	383,30	600,20	357,40	255,00	122,40	92,50	96,40	107,30	134,60	379,20	317,94
1988	519,30	1337,50	876,00	484,60	394,70	291,10	164,40	128,50	99,40	155,30	232,60	205,70	407,43
1989	669,30	822,30	854,60	507,60	252,70	233,10	163,60	141,70	132,40	144,30	174,60	281,10	364,78
1990	329,70	150,80	320,30	254,90	161,70	113,10	105,40	90,50	110,40	101,30	120,60	143,70	166,87
1991	551,80	683,20	639,00	804,50	342,70	174,10	146,40	113,50	108,40	143,30	133,60	214,70	337,93
1992	748,00	402,30	338,10	206,50	193,70	142,20	118,40	95,50	165,40	191,30	360,60	443,50	283,79
1993	310,40	531,30	615,40	499,10	181,70	158,10	112,40	91,50	91,40	152,30	130,60	162,70	253,08
1994	434,80	239,50	526,00	415,30	326,50	183,10	132,40	115,60	92,50	95,30	152,60	294,70	250,69
1995	216,40	969,10	365,10	200,80	138,70	107,10	90,40	71,60	57,40	149,30	253,30	370,20	249,12
1996	831,70	792,50	1,096,20	507,40	262,30	176,10	139,40	116,50	228,80	158,30	600,50	555,60	455,44
1997	1118,40	654,40	557,70	279,50	208,70	188,10	105,40	92,50	103,40	137,30	172,60	316,40	327,87
1998	386,90	635,10	374,90	216,00	126,70	141,10	97,40	91,50	76,40	148,30	217,60	244,70	229,72
1999	782,70	703,80	624,90	274,30	148,70	149,10	112,40	96,60	73,40	86,30	135,60	297,60	290,45
2000	699,70	510,40	399,20	351,90	162,70	127,10	124,40	110,50	140,40	108,30	141,60	283,80	263,33
2001	375,90	463,00	277,80	212,50	133,70	106,10	83,40	65,50	74,40	98,30	157,60	244,70	191,08

Os dados de vazões dos rios afluentes aos futuros reservatórios do AHE Simplício foram estimados com base nas vazões mensais máxima e mínima nas sub-bacias de drenagem de cada reservatório, conforme apresentado na Tabela 2.2.

TABELA 2.2
VAZÕES MENSAIS DAS SUB-BACIAS DE DRENAGEM
DOS RESERVATÓRIOS DO AHE SIMPLÍCIO

SUB-BACIA		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Tocaia	Max	4,13	3,67	3,73	1,73	1,60	1,07	0,94	0,85	0,86	1,23	2,13	2,47
	Med	1,73	1,62	1,39	1,03	0,82	0,68	0,61	0,54	0,55	0,70	0,99	1,49
	Min	0,63	0,32	0,57	0,42	0,37	0,36	0,31	0,29	0,27	0,38	0,50	0,40
Louriçal	Max	11,20	9,96	10,10	4,68	4,34	2,91	2,56	2,29	2,33	3,33	5,77	6,69
	Med	4,68	4,40	3,79	2,79	2,22	1,85	1,66	1,46	1,50	1,91	2,70	4,03
	Min	1,71	0,87	1,54	1,15	0,49	0,98	0,85	0,80	0,75	1,03	1,36	1,00
Calçado	Max	5,03	4,47	4,54	2,11	1,95	1,30	1,14	1,03	1,05	1,50	2,59	3,01
	Med	2,11	1,97	1,69	1,25	1,00	0,83	0,74	0,66	0,67	0,85	1,20	1,81
	Min	0,77	0,39	0,69	0,51	0,45	0,44	0,38	0,35	0,33	0,46	0,61	0,49
Antonina	Max	0,54	0,48	0,48	0,22	0,21	0,14	0,12	0,11	0,11	0,16	0,28	0,32
	Med	0,22	0,21	0,18	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07	0,09	0,13	0,19
	Min	0,08	0,04	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,05
Peixe	Max	0,13	0,11	0,11	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	0,08
	Med	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05
	Min	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Ribeirão do Peixe	Max	18,01	16,01	16,27	7,55	6,98	4,67	4,10	3,71	3,75	5,36	9,29	10,77
	Med	7,55	7,07	6,06	4,49	3,58	2,97	2,66	2,36	2,40	3,05	4,32	6,50
	Min	2,75	1,40	2,49	1,83	1,61	1,57	1,35	1,26	1,18	1,66	2,18	1,74

FONTE: Estudos Ambientais ENGEVIX, 2001.

2.1.3 - Dados de Qualidade da Água

Foram utilizados dados de DBO, OD, temperatura da água, nitrato, nitrogênio amoniacal e fósforo total em pontos na entrada do reservatório de Anta e nos tributários dos reservatórios do AHE Simplício (Tabela 2.3). Tais dados são provenientes da campanha de monitoramento dos meses de maio e junho de 2006. A Tabela 2.4 apresenta a relação dos pontos de monitoramento de qualidade de água cujos dados foram usados neste estudo. A localização desses pontos é apresentada na Figura 2.7.

**TABELA 2.3
DADOS DE QUALIDADE DE ÁGUA UTILIZADOS**

SÍTIO	TEMPERATURA (°C)	DBO (MG/L)	OD (MG/L)	NITRATO (MG/L)	AMÔNIA (MG/L)	FÓSFORO TOTAL (MG/L)
1	22,00	< 2,0	4,35	0,40	0,06	0,06
9	19,45	2,4	7,37	0,20	< 0,01	0,03
15	19,12	< 2,0	7,94	< 0,01	< 0,01	0,03
17	18,58	< 2,0	7,09	0,10	< 0,01	0,02
19	19,24	< 2,0	7,94	0,08	< 0,01	0,02
21	20,00	< 2,0	7,19	0,10	< 0,01	0,03

**TABELA 2.4
RELAÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA USADOS NA MODELAGEM NUMÉRICA**

SÍTIO	LOCALIDADES	LATITUDE	LONGITUDE
1	Montante da foz dos rios Paraibuna e Piabanha	7553367	691239
9	Rio Macuco – futuro reservatório de Anta	7562300	705500
15	Rio Tocaia – montante	7565809	708600
17	Rio Areia – montante	7567955	711879
19	Rio da Prata – montante	7570701	718292
21	Rio do Peixe – Montante	7575000	727100

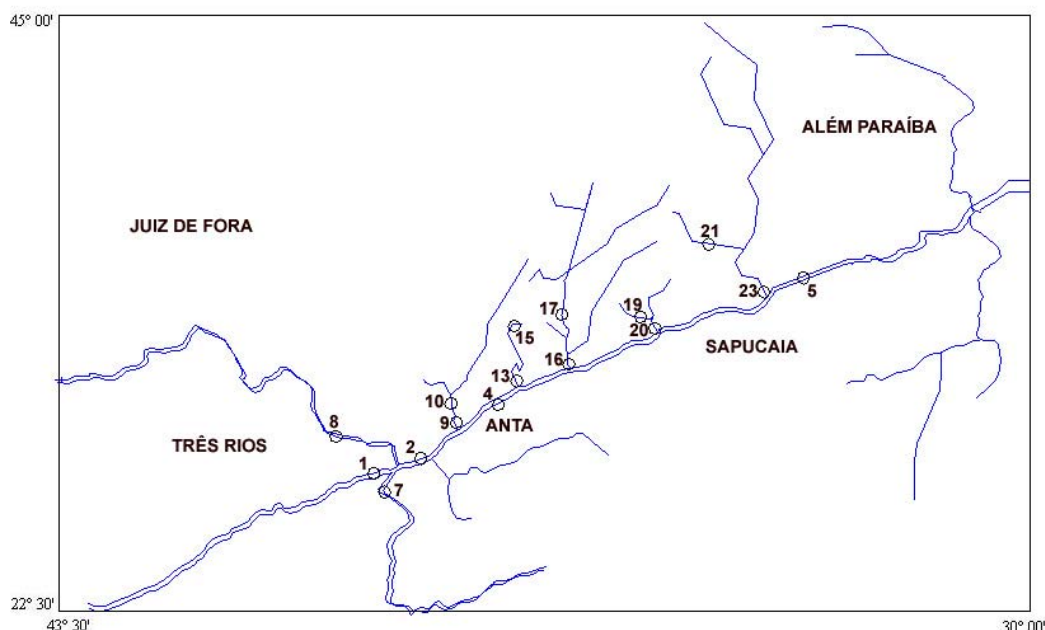


FIGURA 2.7
LOCALIZAÇÃO DOS SÍTIOS DE AMOSTRAGENS NA ÁREA DE INFLUÊNCIA
DIRETA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL. CÓDIGO DOS SÍTIOS
DE AMOSTRAGENS DE ACORDO COM A TABELA 3

2.2 - Metodologia da Modelagem Hidrodinâmica e de Qualidade de Água

2.2.1 - Caracterização da Hidrodinâmica

A circulação hidrodinâmica em reservatórios é dominada principalmente pelas descargas dos tributários, pelos ventos e pelo efeito da radiação solar que provoca variações da temperatura da superfície do lago podendo gerar estratificação térmica.

Tendo em vista as características dos reservatórios do AHE Simplício, podendo ser considerados como reservatórios do tipo fio d'água, é de se esperar que não ocorram estratificações importantes na coluna d'água. Assim sendo, nas simulações hidrodinâmicas dos reservatórios que serão formados, não existe a necessidade de se considerar os efeitos do campo de densidade na circulação dos lagos, ou seja, as simulações foram realizadas considerando um modelo em duas dimensões, desprezando-se qualquer estratificação térmica na vertical.

2.2.2 - Modelagem Hidrodinâmica

Tendo em vista as situações a serem modeladas, foi utilizado o modelo SisBAHIA, desenvolvido pela COPPE – UFRJ, uma vez que este possui módulos capazes de resolver a circulação em corpos de água, além da qualidade e do transporte euleriano e lagrangeano de poluentes e partículas.

O modelo SisBAHIA é o resultado de mais de 10 anos de pesquisas, com resultados que demonstram sua alta qualidade em diversos estudos onde foi necessário um amplo conhecimento da dinâmica física do meio ambiente, sendo utilizado como uma ferramenta imprescindível para diagnósticos e prognósticos qualitativos e quantitativos de fenômenos naturais e ações antrópicas potencialmente impactantes.

a) Modelo Hidrodinâmico

As quatro equações necessárias para calcular as quatro incógnitas da circulação hidrodinâmica, velocidade na direção x, velocidade na direção y, velocidade na direção z e elevação da superfície livre (u, v, w, ζ , respectivamente), no módulo 3D (tridimensional), estão escritas abaixo:

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta v \quad (1)$$

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta u \quad (2)$$

Equação da continuidade (do volume):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (4)$$

Onde u, v e w são, respectivamente, as velocidades nas direções x, y e z , ρ_0 é uma densidade constante de referência, Φ é a velocidade angular de rotação da terra no sistema de coordenadas local e os termos com Φ são as forças de Coriolis, no qual θ é o ângulo de Latitude. ζ é a elevação da superfície livre, τ_{ij} são as tensões de cisalhamento e h é a profundidade.

O módulo 2DH (verticalmente integrado) determina as componentes das velocidades médias na vertical, na direção x e y , respectivamente, $U(x,y,t)$ e $V(x,y,t)$ e as elevações da superfície livre $z=\zeta(x,y,t)$, conforme as seguintes equações:

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_x^B) + 2\Phi \sin \theta V \quad (5)$$

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_x^B) - 2\Phi \sin \theta U \quad (6)$$

onde H é a profundidade, τ_i^S e τ_i^B são as tensões de atrito na superfície (devido ao vento) e no fundo, respectivamente. O índice i representa a direção, por exemplo: $i=1$ componente x, $i=2$ componente y e $i=3$ componente z.

A tensão de atrito devido ao vento é formulada como:

$$\tau_i^S = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos \phi_i \quad [i=1,2] \quad (7)$$

onde ρ_{ar} é a densidade do ar, C_D é o coeficiente de arrasto do vento, W_{10} é o valor local da velocidade do vento medida a 10 metros acima da superfície livre, e ϕ_i é o ângulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção x_i . O coeficiente de arraste do vento pode ser determinado a partir de fórmulas empíricas. A fórmula adotada no modelo SisBahia é:

$$C_D = (0.8 + 0.065 W_{10}) \times 10^{-3}; [W_{10} \text{ em m/s}] \quad (8)$$

A tensão de atrito no fundo pode ser calculada como:

$$\tau_i^B = \rho_0 \beta U_i \quad [i=1,2] \quad (9)$$

onde o parâmetro β depende da maneira em que o módulo 2DH seja empregado, conforme descrito abaixo:

- Módulo 2DH desacoplado do módulo 3D:

$$\beta = \frac{g}{C_h^2} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (10)$$

- Módulo 2DH acoplado com o módulo 3D:

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u_*| \quad (11)$$

C_h é o coeficiente de Chézy, definido como:

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

onde ε é a rugosidade do fundo.

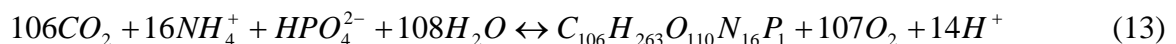
Na modelagem da circulação hidrodinâmica, é necessário o estabelecimento de condições de contorno para o campo de velocidade, ou seja, é necessário conhecer a velocidade afluyente ao reservatório, tanto pelo seu canal principal quanto pelos rios tributários.

2.2.3 - Modelagem Numérica da Qualidade da Água do Reservatório

Entre os principais macro-nutrientes necessários para o desenvolvimento celular estão o *carbono (C)*, o *nitrogênio (N)* e o *fósforo (P)*. O carbono desempenha três importantes funções na análise de qualidade d'água: nutriente, biomassa e poluente. Assim como o fósforo e o nitrogênio, o carbono serve como nutriente para o crescimento de plantas, apesar de não se apresentar como o nutriente limitante para o desenvolvimento das plantas e por isso não precisar ser modelado. Pelo fato do carbono constituir muitos componentes de compostos orgânicos, ele é utilizado para quantificar a biomassa. Finalmente, a decomposição do carbono orgânico pode ter grandes efeitos sobre a concentração de oxigênio e muitas toxinas preferencialmente são associadas à matéria orgânica.

Em conjunto com os nutrientes, o ciclo de alimentação realiza um papel chave no processo de eutrofização. A produção (conversão de nutrientes inorgânicos em matéria orgânica) e a decomposição (processo reverso) representam este ciclo.

Assim, a composição da matéria orgânica desidratada pode ser idealizada pela seguinte representação detalhada do processo de fotossíntese/respiração (STUMM e MORGAN, 1981):



Esta fórmula pode ser utilizada para determinar a razão de massa de carbono entre o nitrogênio e o fósforo:

$$\begin{array}{r} C : N : P \\ 106 \times 12 : 16 \times 14 : 1 \times 31 \\ 1272 : 224 : 31 \\ 40\% : 7,2\% : 1\% \end{array}$$

Assim, um grama de matéria orgânica seca contém aproximadamente 10 mg de fósforo, 72 mg de nitrogênio e 400 mg de carbono.

a) Forçantes Meteorológicas

Para a modelagem da qualidade da água, há necessidade de conhecimento de parâmetros meteorológicos como velocidade do vento (influencia a oxigenação do corpo d'água), a radiação solar, e a própria temperatura da água.

No caso deste trabalho as forçantes meteorológicas radiação solar e temperatura da água foram utilizadas. A velocidade e direção dos ventos não foram utilizadas, pois o objetivo foi o de simular o caso mais crítico para o problema do tempo de residência das águas nos reservatórios.

b) Forçantes Hidrológicas e Cargas

Normalmente os reservatórios estão sujeitos a contribuições de vazões e cargas advindas das suas bacias hidrográficas de contribuição. Assim, é importante que se conheçam as vazões de entrada e saída do reservatório, para o conhecimento e modelagem da hidrodinâmica.

Além disso, é primordial que se conheçam as concentrações (cargas) dos componentes físicos/químicos/biológicos que compõem as contribuições para o reservatório através dos tributários.

2.2.4 - O Modelo de Qualidade de Água¹

O Modelo de Qualidade de Água desenvolvido é integrado na vertical, para escalares passivos e não-conservativos. Escalares não-conservativos, que representam à 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. 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. Como consequência, a modelagem do padrão hidrodinâmico do corpo de água e a modelagem do transporte do escalar são problemas desacoplados. Assim, para que ocorra uma boa simulação do transporte do escalar, uma adequada simulação do campo hidrodinâmico torna-se necessário.

Em relação aos mecanismos de transporte de uma dada substância em um corpo de água, o processo advectivo é dominante, sugerindo assim uma enorme dependência entre a simulação hidrodinâmica e o processo de transporte. No entanto, os processos difusivos também são muito importantes para a definição do transporte.

O modelo de qualidade de água considera o ciclo do oxigênio, do nitrogênio e do fósforo. Como as reações cinéticas modeladas variam fortemente com a temperatura e salinidade

¹ Adaptado de Cunha e Rosman, 2005.

(SELLERS, 1965), o modelo foi construído considerando os seguintes 11 escalares listados:

- Amônia;
- Nitrato;
- Nitrogênio Orgânico;
- Biomassa de Fitoplâncton;
- Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO;
- Oxigênio Dissolvido – OD;
- Fósforo Inorgânico;
- Fósforo Orgânico;
- Clorofila_A;
- Temperatura;
- Salinidade.

OD-DBO:

Os processos cinéticos de transformações incluem no ciclo do oxigênio as incógnitas: Demanda Bioquímica de Oxigênio, DBO e o Oxigênio Dissolvido, OD. Os processos cinéticos envolvidos são, (MUHAMMETOGLU & SOYUPAK, 2000):

Para a DBO estão incluídos: decaimento, oxidação, desnitrificação e deposição.

Para o OD estão incluídos: reaeração, crescimento, respiração, nitrificação, oxidação e demanda de oxigênio devido ao sedimento.

Fósforo:

No ciclo do fósforo têm-se, como incógnitas, Fósforo Orgânico e Fósforo Inorgânico. Os processos cinéticos envolvidos são:

Para o Fósforo Orgânico: decaimento, mineralização e deposição.

Para o Fósforo Inorgânico: decaimento, mineralização e crescimento.

Nitrogênio:

No ciclo do nitrogênio têm-se, como incógnitas, Nitrogênio Orgânico, Nitrato, Biomassa de Fitoplâncton e Amônia. Os processos cinéticos envolvidos são:

Para o Nitrogênio Orgânico: decaimento, mineralização e deposição.

Para o Nitrato: nitrificação, crescimento e desnitrificação.

Para a Biomassa de Fitoplâncton: crescimento, decaimento e sedimentação.

Para a Amônia: Mineralização, decaimento, crescimento e nitrificação.

A Figura 2.8 mostra os ciclos e suas interações, considerando 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 de primeira ordem, com coeficientes calculados de forma experimental em laboratórios ou através de experimentos de campo, adquirindo valores dentro de uma faixa específica. Com isso, são grandes as 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.

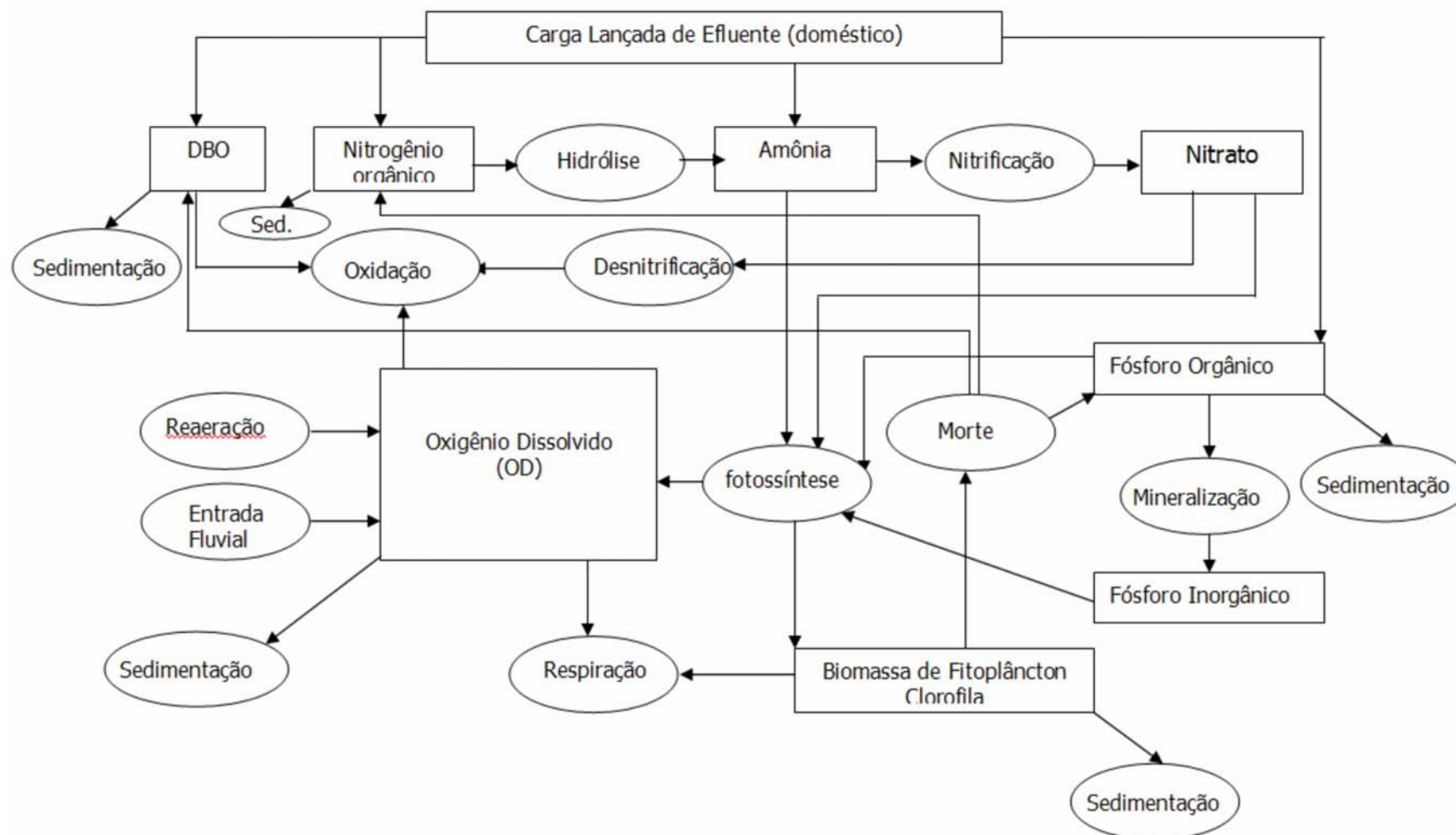


FIGURA 2.8
ESQUEMA APRESENTANDO OS CICLOS E SUAS INTERAÇÕES DO MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA

Equação de Transporte

A equação bidimensional que descreve o transporte de um escalar para variáveis médias ou de grande escala (Bedford, 1994), usando a técnica de filtragem para a modelagem das tensões turbulentas (mais detalhes em Rosman, 2000), é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(H \left[D_{ij} \delta_{jk} + \frac{\Lambda_k^2}{12} \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x_k} \right) + \Sigma R \quad (14)$$

onde C é a concentração do escalar de interesse, U_i são as componentes da velocidade na direção x_i promediadas na direção vertical, ΣR representa reações cinéticas de produção ou consumo, H é a altura da coluna de água, D_{ij} é o tensor que representa o coeficiente de difusão turbulenta de massa, δ_{jk} representa o delta de Kronecker e Λ_k é a largura do filtro na dimensão x_k , sendo α_k um parâmetro de escala. Os valores típicos de α_k calibrados para difusão/advecção são da ordem de 0.25 a 2.0, com valor usual igual a 1.0. Na equação (1), $i, j = 1, 2$ e $k = 1, 2, 3$, sendo $k = 3$ correspondente ao tempo t (no contexto $x_3 = t$).

Condições de contorno:

No modelo de transporte têm-se as condições de contorno de terra e aberto. Em todos estes contornos há condição de fluxo advectivo e difusivo segundo a direção normal. Esta condição pode ser genericamente escrita como:

$$U_N C - \left(D_N + \frac{\Lambda_N^2}{12} \left| \frac{\partial U_N}{\partial x_N} \right| \right) \frac{\partial C}{\partial x_N} = f_N^* \quad (15)$$

onde o subscrito N representa a direção normal e f_N^* o fluxo normal prescrito na fronteira.

Em geral, ao longo dos contornos de terra, U_N e f_N^* são nulos em todos os nós. Neste caso, a equação resolvida nos nós de contorno de terra corresponde a:

$$\frac{\partial C}{\partial x_N} = 0 \quad (16)$$

Ao longo da fronteira aberta é usual desconsiderar o fluxo difusivo. Em casos de efluxo, isto é, quando o transporte é para fora do domínio, o modelo resolve somente os termos advectivos, desprezando os termos difusivos, como se segue:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \Sigma R \quad (17)$$

Ainda nas fronteiras abertas, e no caso de afluxo, quando a substância ingressa no domínio, a seguinte condição é considerada (ROSMAN, 2000):

$$\text{Enquanto } (t-t_o) \leq \tau: \quad C = C_o + \frac{C^* - C_o}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(t-t_o)}{\tau}\right) \right] \quad (18)$$

$$\text{Quando } (t-t_o) > \tau: \quad C = C^* \quad (19)$$

onde C^* representa o valor da concentração prescrita, C_o é o valor da concentração calculada no ponto de contorno no instante t_o , ou seja, no momento de inversão da situação de efluxo para afluxo e τ é o período de transição, dado pelo modelador, baseado em dados pretéritos. Usualmente este valor varia entre 0.5 e 1.0 hora. A visualização deste efeito pode ser observada na Figura 2.9.

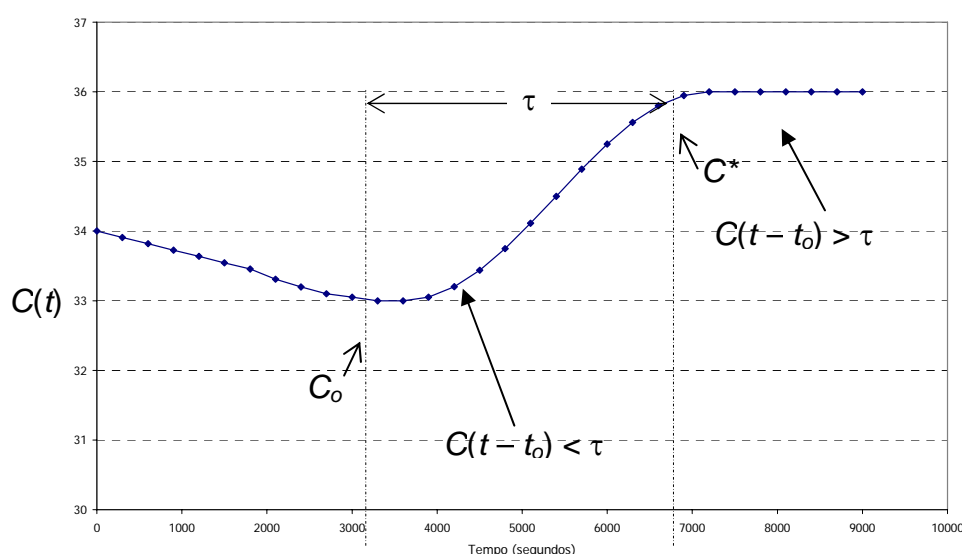


FIGURA 2.9
VISUALIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO DE AFLUXO, USANDO VALORES TÍPICOS DE CONCENTRAÇÃO DE SAL COMO EXEMPLO.

Reações cinéticas e suas relações

Considerando que a equação de advecção-difusão para cada substância é formada por três parcelas: o transporte advectivo, o transporte difusivo e os processos de transformação, podem escrever como (THOMAN & MULLER, 1987 e SHENG & VILLARET, 1989):

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + U_i \frac{\partial C_m}{\partial x_i} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(H \left[D_{ij} \delta_{jk} + \frac{\Lambda_k^2}{12} \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| \right] \frac{\partial C_m}{\partial x_k} \right) + \Sigma R \quad (20)$$

onde C_m é a concentração da substância de interesse, sendo m é dado por:

m	SUBSTÂNCIA	SÍMBOLO
1	Concentração de amônia	C_1
2	Concentração de nitrato	C_2
3	Concentração de Fósforo Inorgânico	C_3

m	SUBSTÂNCIA	SÍMBOLO
4	Concentração de biomassa de fitoplâncton	C_4
5	Concentração de DBO.	C_5
6	Concentração de OD	C_6
7	Concentração de Nitrogênio Orgânico	C_7
8	Concentração de Fósforo Orgânico	C_8
9	Concentração de Clorofila	C_9
T	Temperatura ("concentração de calor")	C_T
S	Salinidade (concentração de sal)	C_S

Reações cinéticas

As reações cinéticas envolvidas nos processos de transformação, consideradas para cada substância modelada são obtidas segundo as equações (HAMILTON & SCHLADOW, 1997):

Demanda Bioquímica de Oxigênio (C_5):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_5}{\partial t} = & a_{oc} K_{1D} C_4 - K_D \Theta_D^{(T-20)} \left(\frac{C_6}{K_{DBO} + C_6} \right) C_5 - \frac{V_{s3}(1-f_{D5})}{H} C_5 \\ & - \frac{5.32}{4.14} K_{2D} \Theta_{2D}^{(T-20)} \left(\frac{K_{NO3}}{K_{NO3} + C_6} \right) C_2 \end{aligned} \quad (21)$$

Oxigênio Dissolvido (C_6):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_6}{\partial t} = & K_a \Theta_a^{(T-20)} (C_s - C_6) - K_D \Theta_D^{(T-20)} \left(\frac{C_6}{K_{DBO} + C_6} \right) C_5 - \frac{64}{14} K_{12} \Theta_{12}^{(T-20)} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6} \right) C_1 \\ & + G_{PI} \left(\frac{32}{12} + \frac{48.14}{14.12} (1 - P_{NH3}) \right) C_4 - \frac{32}{12} K_{1R} \Theta_{1R}^{(T-20)} C_4 - \frac{SOD}{H} \Theta_s^{(T-20)} \end{aligned} \quad (22)$$

A formulação de K_a :

$$K_a = \frac{21.7V^{0.67}}{H^{1.85}} \quad (23)$$

C_s é dado por:

$$\begin{aligned} \ln(C_s) = & -139.34 + \frac{1.5757 \cdot 10^5}{T} - \frac{6.6423 \cdot 10^7}{T^2} + \frac{1.2438 \cdot 10^{10}}{T^3} - \frac{8.6219 \cdot 10^{11}}{T^4} - \\ & S \left(1.7674 \cdot 10^{-2} - \frac{1.0754 \cdot 10^1}{T} + \frac{2.1407 \cdot 10^3}{T^2} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

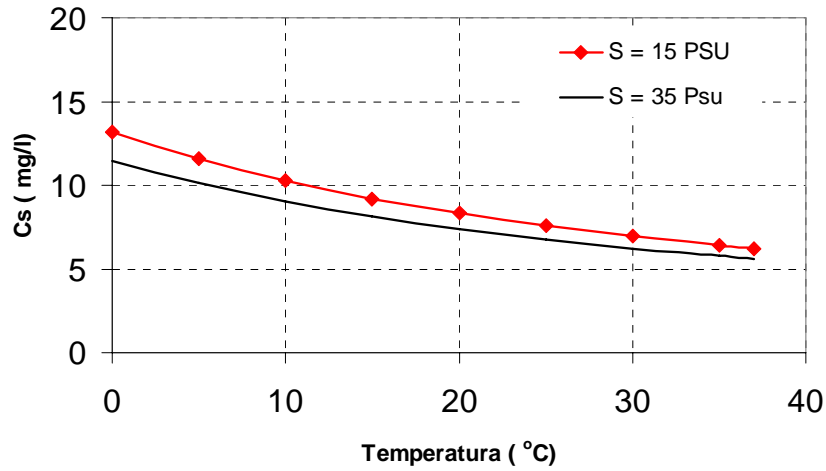


FIGURA 2.10
CS PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA
E CONCENTRAÇÕES DE SAL.

Nitrogênio Orgânico (C_7):

$$\frac{\partial C_7}{\partial t} = D_{PI} \Theta_{Dpi}^{T-20} a_{nc} f_{on} C_4 - K_{71} \Theta_{71}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mPc} + C_4} \right) C_7 - \frac{V_{s3}(1-f_{D7})}{H} C_7 \quad (25)$$

Amônia (C_1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_1}{\partial t} = & D_{PI} \Theta_{Dpi}^{T-20} a_{nc} (1-f_{on}) C_4 + K_{71} \Theta_{71}^{T-20} \left(\frac{C_4}{K_{mPc} + C_4} \right) C_7 - \\ & G_{PI} a_{nc} P_{NH3} C_4 - K_{12} \Theta_{12}^{T-20} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6} \right) C_1 \end{aligned} \quad (26)$$

A formulação de P_{NH3} :

$$P_{NH3} = C_1 \left[\frac{C_2}{(K_{nM} + C_1)(K_{nM} + C_2)} + \frac{K_{nM}}{(C_1 + C_2)(K_{nM} + C_2)} \right]$$

onde $K_{nM} = 0$ a 35, 15 a 150, 25, 50 a 500, 200 ou 340. (27)

Nitrato (C_2):

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = K_{12} \Theta_{12}^{T-20} \left(\frac{C_6}{K_{NIT} + C_6} \right) C_1 - K_{2D} \Theta_{2D}^{T-20} \left(\frac{K_{NO3}}{K_{NO3} + C_6} \right) C_2 - G_{PI} a_{nc} (1-P_{NH3}) C_4 \quad (28)$$

Biomassa (C_4):

$$\frac{\partial(a_{pc}C_4)}{\partial t} = G_{PI}a_{pc}C_4 - D_{PI}a_{pc}\Theta_{Dpi}^{T-20}C_4 - \frac{V_{s4}}{H}a_{pc}C_4 \quad (29)$$

$$\frac{\partial(a_{nc}C_4)}{\partial t} = G_{PI}a_{nc}C_4 - D_{PI}a_{nc}\Theta_{Dpi}^{T-20}C_4 - \frac{V_{s4}}{H}a_{nc}C_4 \quad (30)$$

Fósforo Inorgânico (C_3):

$$\frac{\partial C_3}{\partial t} = D_{PI}a_{pc}\Theta_{Dpi}^{T-20}(1-f_{op})C_4 + K_{83}\Theta_{83}^{T-20}\left(\frac{C_4}{K_{mPc} + C_4}\right)C_8 - G_{PI}a_{pc}C_4 \quad (31)$$

Fósforo orgânico (C_8):

$$\frac{\partial C_8}{\partial t} = D_{PI}a_{pc}\Theta_{Dpi}^{T-20}f_{op}C_4 - K_{83}\Theta_{83}^{T-20}\left(\frac{C_4}{K_{mPc} + C_4}\right)C_8 - \frac{V_{s3}(1-f_{D8})}{H}C_8 \quad (32)$$

Clorofila (C_9):

$$\frac{\partial C_9}{\partial t} = \alpha_0 C_4 \quad (33)$$

Os coeficientes usados no modelo podendo ser observado na Tabela 2.5 a seguir.

TABELA 2.5
PARÂMETROS CONSIDERADOS NO MQA DO SISBAHIA®.

SÍMBOLO	PARÂMETRO	UNIDADE
α_0	Fator de conversão da clorofila em biomassa de fitoplâncton	ug Chla/mg C_4
Θ_{12}	Coeficiente de temperatura para a nitrificação	
Θ_{1R}	Coeficiente de temperatura para a respiração da biomassa.	
Θ_{2D}	Coeficiente de temperatura para desnitrificação	
Θ_{71}	Coeficiente de temperatura para a mineralização do nitrogênio orgânico	
Θ_{83}	Coeficiente de temperatura para a mineralização do fósforo orgânico	
Θ_a	Coeficiente de temperatura para a reaeração	
Θ_D	Coeficiente de temperatura para a desoxigenação	
Θ_{Dpi}	Coeficiente de temperatura para o decaimento da biomassa	
Θ_s	Coeficiente de temperatura para o SOD	
a_{nc}	Relação carbono-nitrogênio	mg N/ mg C
a_{pc}	Relação carbono-fósforo	mg P/ mg C
D_{PI}	Coeficiente de decaimento da biomassa em 20°C	/dia

SÍMBOLO	PARÂMETRO	UNIDADE
F_{D5}	Fração de DBO dissolvido na coluna de água,	
f_{D7}	Fração de nitrogênio orgânico dissolvido na coluna de água	
f_{D8}	Fração de fósforo orgânico dissolvido na coluna de água.	
f_{on}	Fração de morte e respiração da biomassa	
f_{op}	Fração de morte e respiração da fitoplâncton	
G_{PI}	Taxa de crescimento	/dia
K_{12}	Coeficiente de nitrificação em 20°C	/dia
K_{1D}	Coeficiente de decaimento da biomassa	/dia
K_{1R}	Coeficiente de respiração da biomassa em 20°C	/dia
K_{2D}	Coeficiente de desnitrificação em 20°C	/dia
K_{71}	Coeficiente de mineralização do nitrogênio orgânico	/dia
K_{83}	Coeficiente de mineralização do fósforo orgânico	/dia
K_a	Coeficiente de reaeração em 20°C	/dia
K_D	Coeficiente de desoxigenação em 20°C	/dia
K_{DBO}	Constante de meia saturação para oxidação da DBO	mg O ₂ /L
K_{mN}	coef. usado para calcular o PNH ₃	µg N/L
K_{mPc}	Constante para meia mineralização do fitoplâncton	mg C/L
K_{NIT}	Constante de meia saturação para OD limitado pelo processo de nitrificação	mg O ₂ /L
K_{NO3}	Constante de meia saturação limitado pelo OD	mg N/L
P_{NH3}	Termo de referência da amônia	
SOD	Demanda de oxigênio no sedimento	g/mg dia
V_{S3}	Velocidade de deposição de substância orgânica	m/dia
V_{S4}	Velocidade de sedimentação da biomassa	m/dia

2.3 - Cenários de Modelagem Hidrodinâmica

Os cenários de modelagem hidrodinâmica do AHE Simplício foram criados para diagnosticar regiões de estagnação nos cinco reservatórios deste AHE, seja no canal principal ou no leito de seus tributários. Deste modo foram simulados dois cenários hidrológicos distintos em cada um dos reservatórios: o cenário de cheia e o cenário de estiagem.

2.3.1 - Configuração Hidrológica do Cenário de Cheia

No cenário de cheia foi considerada a média das máximas vazões dos meses chuvosos (novembro a abril) – 1 275 m³/s – como a vazão do rio Paraíba do Sul afluente ao reservatório de Anta. Já nos tributários aos reservatórios foi considerada a média das máximas vazões mensais de suas respectivas sub-bacias de drenagem, apresentadas na Tabela 2.

Uma vez que o AHE Simplício se constitui em uma cascata de cinco reservatórios (Anta, Tocaia, Lourical, Calçado, Antonina e Peixe, nesta ordem de montante para jusante) e que a vazão máxima a ser turbinada é de 340 m³/s, já no reservatório de Anta foi

considerada a regularização das vazões, permitindo a passagem de no máximo 340 m³/s pela tomada d'água, sendo o restante devolvido ao leito do Paraíba do Sul como vazão remanescente.

2.3.2 - Configuração Hidrológica do Cenário de Estiagem

Para a definição das vazões afluentes de estiagem foi observado o cenário mais crítico de operação do AHE Simplício. Este AHE possuirá três turbinas com vazão nominal de 113 m³/s cada uma. Uma vez que a vazão mínima de operação de cada turbina é de 50% da vazão nominal e que o cenário mais crítico de turbinamento é o funcionamento de apenas uma turbina, a vazão mínima que deve ser turbinada pelo AHE Simplício é de 56,5 m³/s. Ao somar a vazão mínima remanescente no rio Paraíba do Sul (71 m³/s) a esta vazão mínima de operação do AHE Simplício, encontra-se o valor de 127,5 m³/s. Desta forma, a vazão do rio Paraíba do Sul somada à vazão dos tributários afluentes ao reservatório de Anta no cenário de estiagem foi considerada como sendo de 127,5 m³/s. Sendo que nos tributários ao reservatório de Anta e aos demais, foi considerada a média das mínimas vazões mensais de suas respectivas sub-bacias de drenagem, apresentadas na Tabela 2.2.

2.3.3 - Reservatório de Anta

O reservatório de Anta, ilustrado na Figura 2.1, é o primeiro do AHE Simplício, sendo responsável pela regularização das vazões do rio Paraíba do Sul e pelo controle das vazões que serão desviadas para o circuito de reservatórios e das vazões que serão devolvidas ao leito do Paraíba do Sul. Seu principal tributário é o rio Macuco, cujas médias das vazões máximas e mínimas mensais são de 6,9 m³/s e 1,74 m³/s, segundo dados disponibilizados pela ANA.

a) Cenário de Cheia

O cenário de cheia produziu velocidades mais altas no início do reservatório (da ordem de 0,7 m/s), baixando para velocidades entre 0,4 e 0,5 m/s no centro do reservatório e velocidades mais baixas no final do reservatório, chegando a 0,02 m/s em alguns pontos. Em geral os braços do reservatório foram recirculados com velocidades que variam entre 0,02 e 0,04 m/s. A Figura 2.11 ilustra o campo de velocidades do reservatório de Anta no cenário de cheia.

Campo de Velocidades em Anta
Vazão Máxima

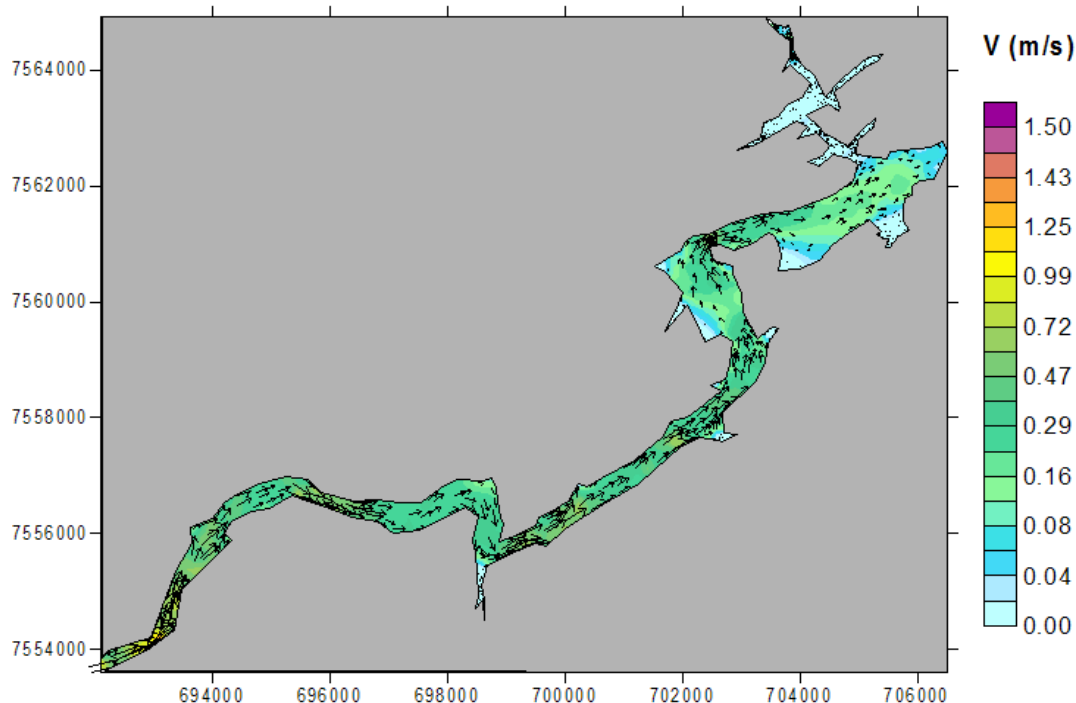


FIGURA 2.11
CAMPO DE VELOCIDADES NO RESERVATÓRIO
DE ANTA COM VAZÃO MÁXIMA

O campo de velocidades nas saídas do reservatório apresentou resultados adequados, sendo os maiores valores de velocidade verificados no vertimento para o rio Paraíba do Sul (vazão de $941,9 \text{ m}^3/\text{s}$) e valores mais baixos na tomada d'água de Anta (vazão de $340 \text{ m}^3/\text{s}$), conforme ilustrado na Figura 2.12. Percebe-se que na linha de separação do fluxo as velocidades são gradativamente mais baixas.

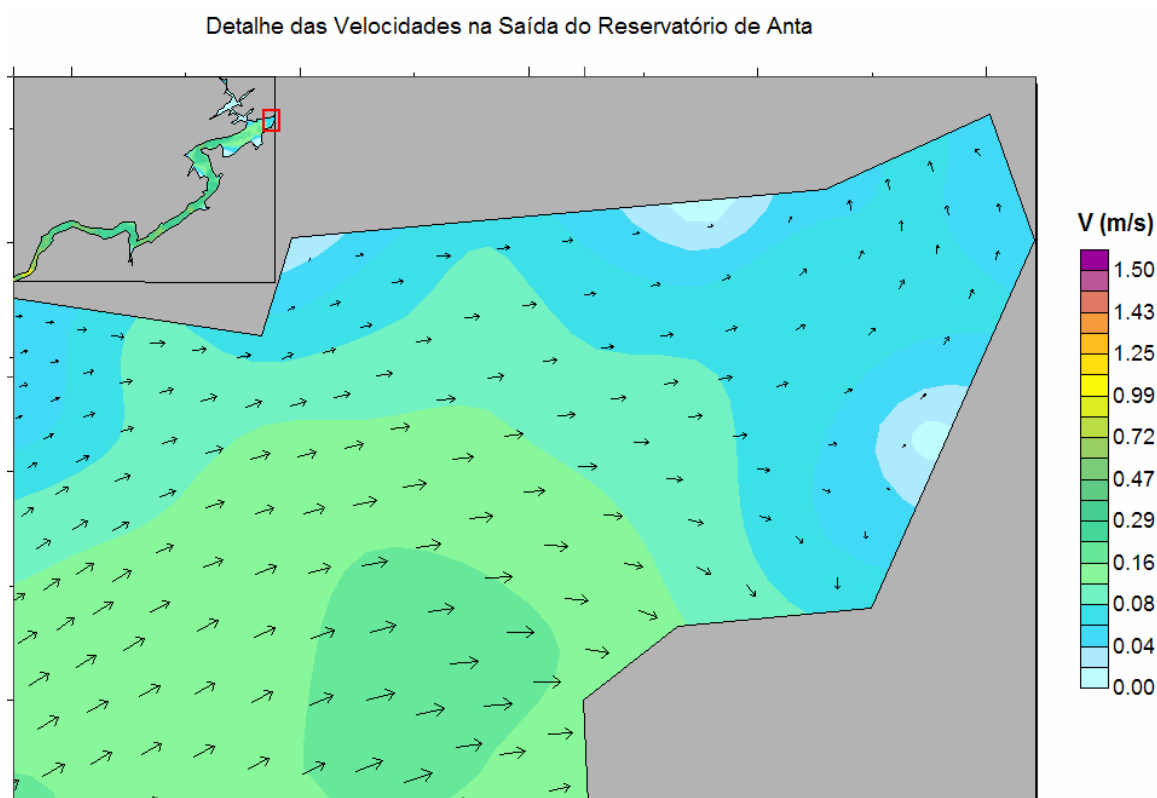


FIGURA 2.12
CAMPO DE VELOCIDADES NA SAÍDA DO RESERVATÓRIO
DE ANTA COM CENÁRIO DE VAZÃO MÁXIMA

Ao observar o campo de velocidades na foz do rio Macuco na Figura 2.11, percebe-se que este não foi represado pela corrente do canal principal do reservatório. Este fato provavelmente é devido à vazão do rio Macuco neste cenário ($6,9 \text{ m}^3/\text{s}$) e ao relativo alinhamento da foz do rio Macuco com a direção do escoamento principal, como pode ser visto na Figura 2.13, o que gera uma diminuição das pressões próximas à foz, criando condições para a descarga do rio.

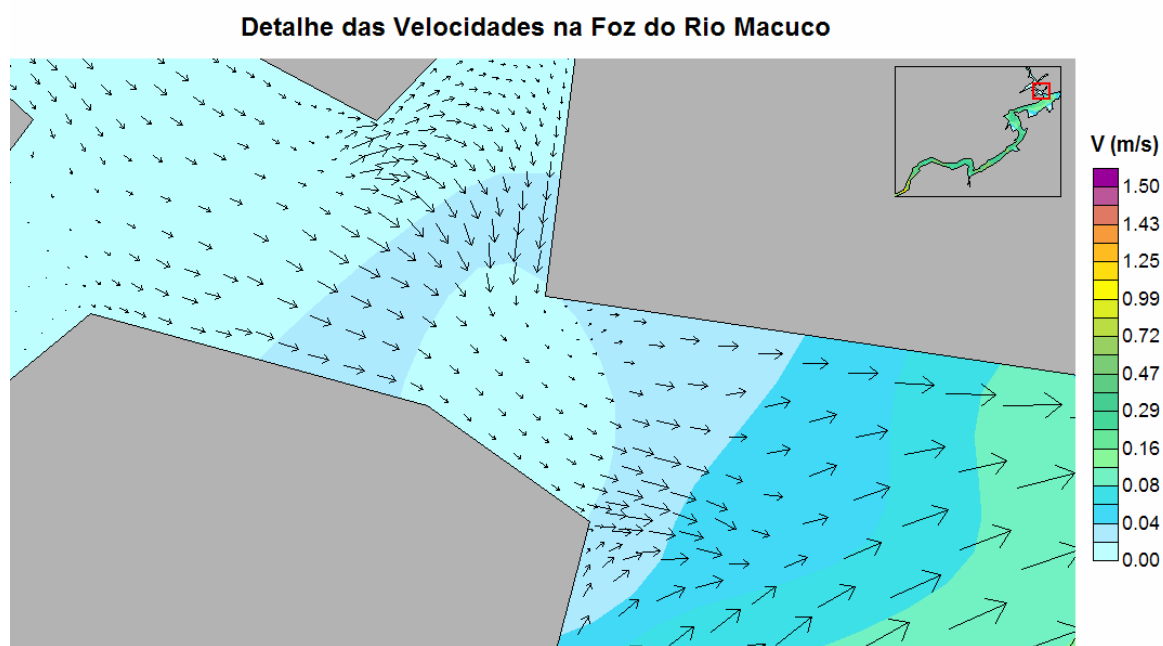
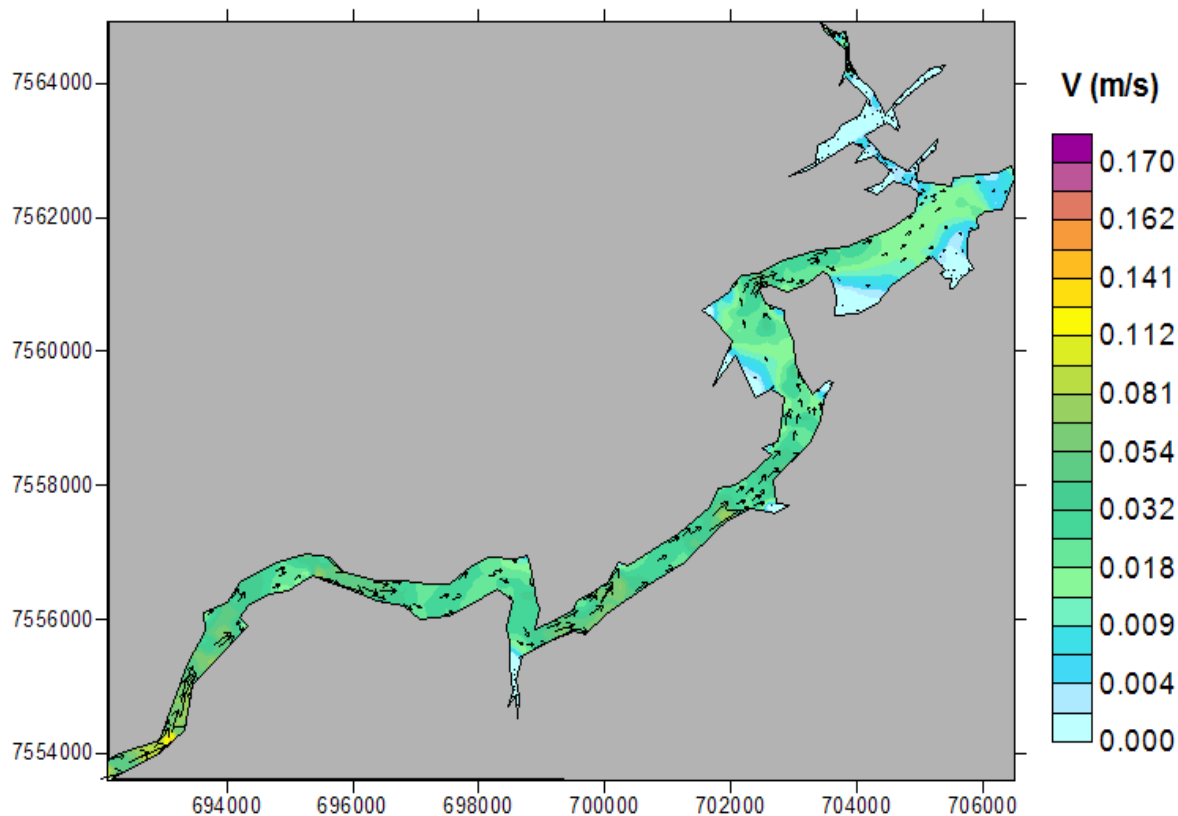


FIGURA 2.13
CAMPO DE VELOCIDADES NA FOZ DO RIO MACUCO
COM CENÁRIO DE VAZÃO MÁXIMA

b) Cenário de Estiagem

Assim como no cenário de cheia, o cenário de estiagem produziu velocidades mais altas no início do reservatório (entre 0,05 e 0,08 m/s), baixando para velocidades entre 0,02 e 0,05 m/s no centro do reservatório e velocidades mais baixas no final do reservatório, chegando a 0,002 m/s em alguns pontos. Em geral os braços do reservatório foram recirculados com velocidades que variam entre 0,002 e 0,006 m/s. A Figura 2.14 ilustra o campo de velocidades do reservatório de Anta no cenário de estiagem.

**Campo de Velocidades em Anta
Vazão Mínima**



**FIGURA 2.14
CAMPO DE VELOCIDADES NO RESERVATÓRIO
DE ANTA COM VAZÃO MÍNIMA**

O campo de velocidades nas saídas do reservatório apresentou resultados adequados, sendo os maiores valores de velocidade verificados no vertimento para o rio Paraíba do Sul (vazão de 71 m³/s) e valores mais baixos na região da tomada d'água de Anta, conforme ilustrado na Figura 2.15. Percebe-se que a linha de separação do fluxo não é pronunciada como o cenário de vazão de cheia, provavelmente devido ao relativo equilíbrio entre as vazões de vertimento e turbinada.

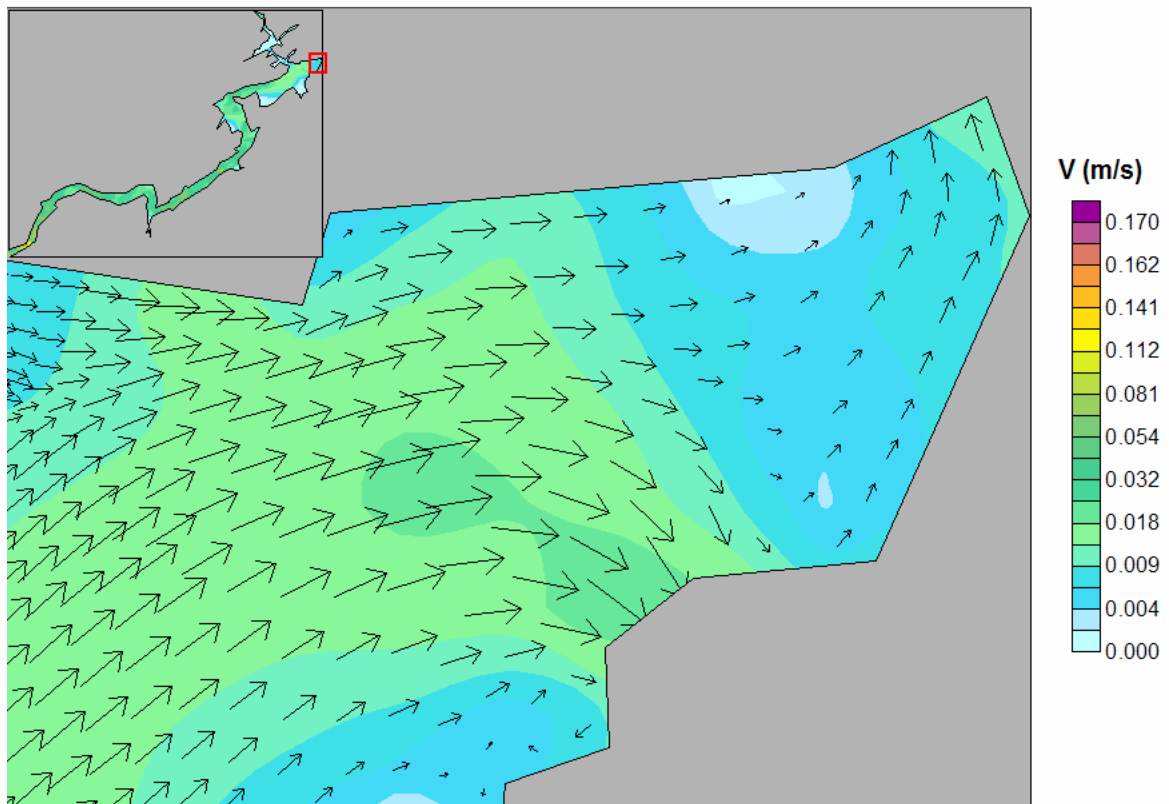
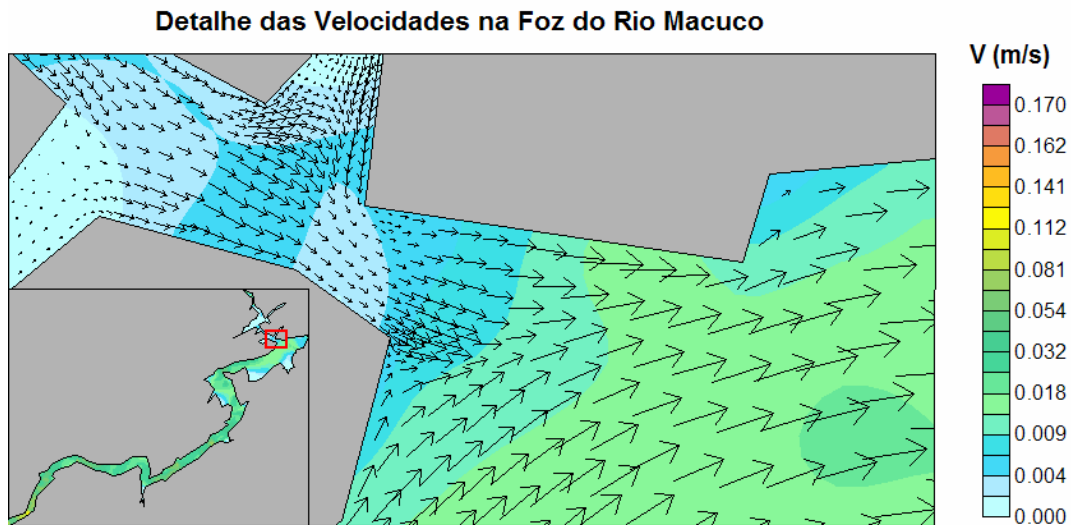
Detalhe das Velocidades na Saída do Reservatório de Anta


FIGURA 2.15
CAMPO DE VELOCIDADES NA SAÍDA DO RESERVATÓRIO
DE ANTA COM CENÁRIO DE VAZÃO MÍNIMA

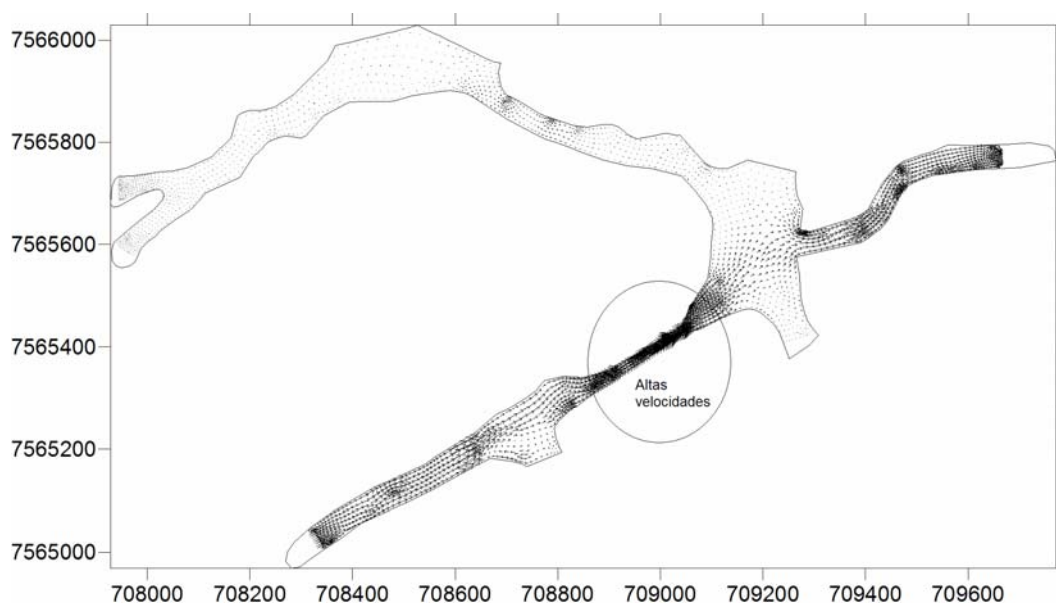
Da mesma forma do cenário de cheia, ao observar o campo de velocidades na foz do rio Macuco no cenário de estiagem (Figura 2.16), pode-se verificar que este não foi represado pela corrente do canal principal do reservatório. Este fato provavelmente é devido ao relativo alinhamento da foz do rio Macuco com a direção do escoamento principal, como pode ser visto na Figura 2.16, o que gera uma diminuição das pressões próximas à foz, criando condições para a descarga do rio.



**FIGURA 2.16
CAMPO DE VELOCIDADES NA FOZ DO RIO MACUCO
COM CENÁRIO DE VAZÃO MÍNIMA**

2.3.4 - Reservatório de Tocaia

O reservatório de Tocaia possui, em seu canal principal, uma largura reduzida em se tratando de reservatórios, na qual pode fluir uma vazão máxima de $340 \text{ m}^3/\text{s}$ gerando velocidades de escoamento muito altas. Tais velocidades fazem com que o modelo hidrodinâmico tenha problemas na resolução das equações matemáticas nesse trecho, sendo incapaz de gerar resultados até a estabilização das velocidades. Assim, apenas resultados parciais da hidrodinâmica do reservatório completo puderam ser gerados. Um exemplo dessa simulação pode ser vista na Figura 2.17.



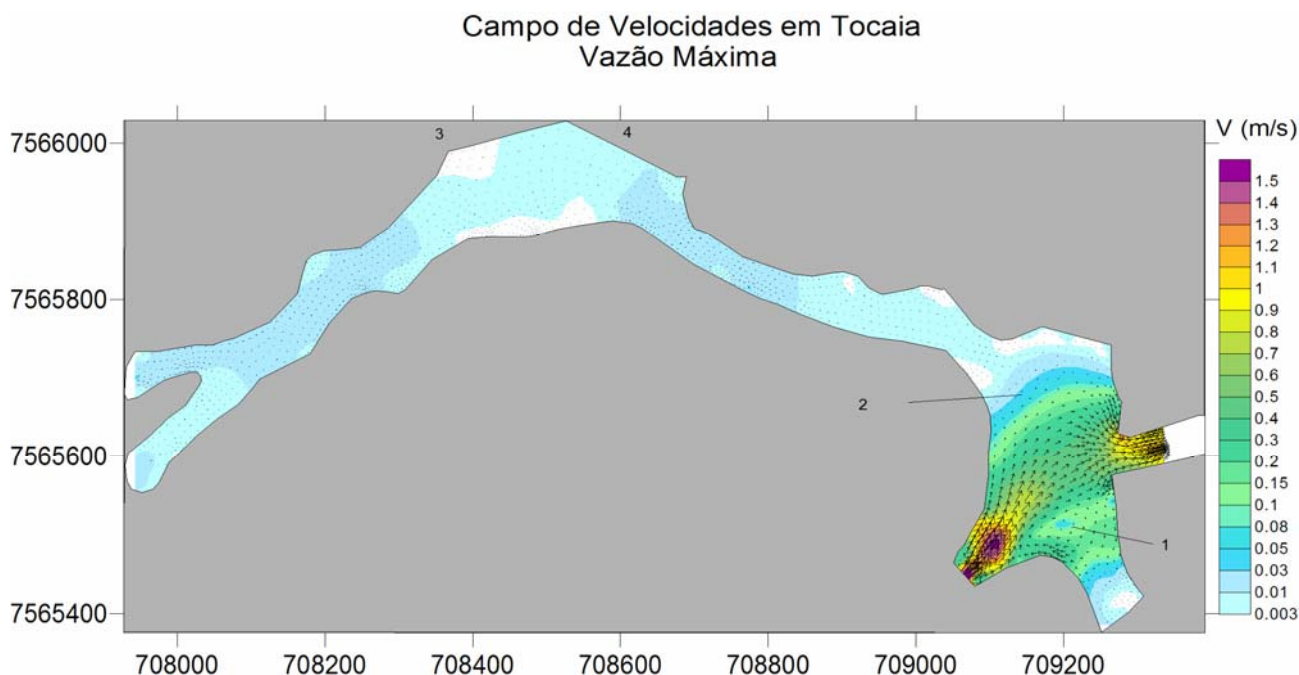
**FIGURA 2.17
HIDRODINÂMICA PARCIAL PARA O RESERVATÓRIO TOCAIA**

Com o objetivo de superar as dificuldades citadas, foi estabelecido um novo domínio para o reservatório, mais simplificado, como já mostrado na Figura 2.3. Nesse reservatório, alguns problemas de circulação foram indicados no trabalho anterior. Porém, o planejamento de dois bota-foras acima do nível da água no reservatório mudou o formato de um trecho do braço principal, fazendo com que o fluxo tivesse uma área de seção transversal menor para atravessar, aumentando as velocidades nesse local. A mudança no contorno desse reservatório está apontada com os números 3 e 4 na Figura 2.18.

Para o reservatório Tocaia foram definidos dois cenários hidrológicos para simular a hidrodinâmica. O primeiro foi o cenário de cheia, em que foram consideradas as máximas vazões mensais afluentes ao reservatório (340 m³/s vindos do reservatório Anta e 2,03 m³/s do rio Tocaia, afluente ao lago). O segundo foi o cenário de estiagem, em que foram consideradas as mínimas vazões mensais afluentes ao reservatório (56,5 m³/s vindos do reservatório Anta e 0,4 m³/s do rio Tocaia, afluente ao lago).

a) Cenário de Cheia

Já com o novo domínio estabelecido, foram executadas as simulações para as vazões média e mínima.



Devido à pequena largura no começo de seu canal principal, observa-se velocidades altas (da ordem de 1,5 m/s) nesse trecho, Figura 2.18. Trechos com cor branca apresentam velocidade bem baixa em relação ao reservatório como um todo. O ponto 1 apresenta uma região de recirculação, enquanto que o ponto 2 mostra que a velocidade do fluxo

principal se reduz rapidamente à medida que se aproxima do braço formado pelo rio Tocaia.

Ainda na modelagem para o cenário de cheia para o reservatório Tocaia, foram executadas simulações de transporte de partículas. O objetivo dessas simulações era efetuar cálculos do tempo de viagem de uma partícula entre a entrada do braço do rio Tocaia e a saída do reservatório. Esse cálculo é importante para identificar possíveis áreas de estagnação do fluxo da água e entender o mecanismo de renovação da água nesse trecho do lago.

As figuras 2.19, 2.20 e 2.21 mostram, respectivamente, o instante de lançamento das partículas e a situação após 1 e 5 dias. Percebe-se que ao final do primeiro dia, as partículas já percorreram o primeiro trecho do braço do rio Tocaia e chegaram a uma área com seção transversal mais larga e com velocidades mais baixas. A partir daí, as partículas partem para um canal mais estreito, com velocidade um pouco maiores.

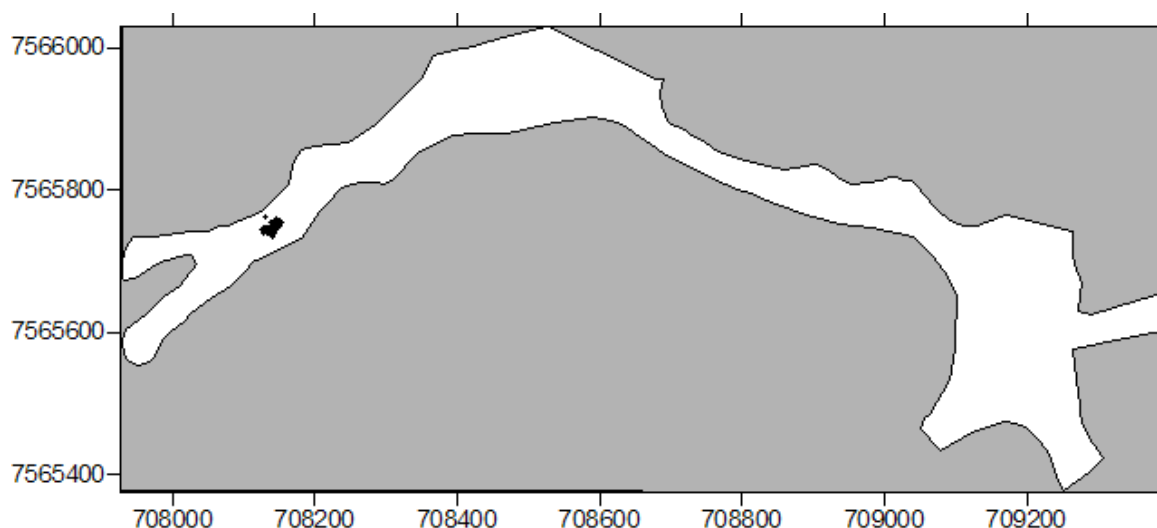


FIGURA 2.19
INSTANTE DO LANÇAMENTO PARA SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE
PARTÍCULAS NO RESERVATÓRIO TOCAIA COM VAZÃO MÁXIMA

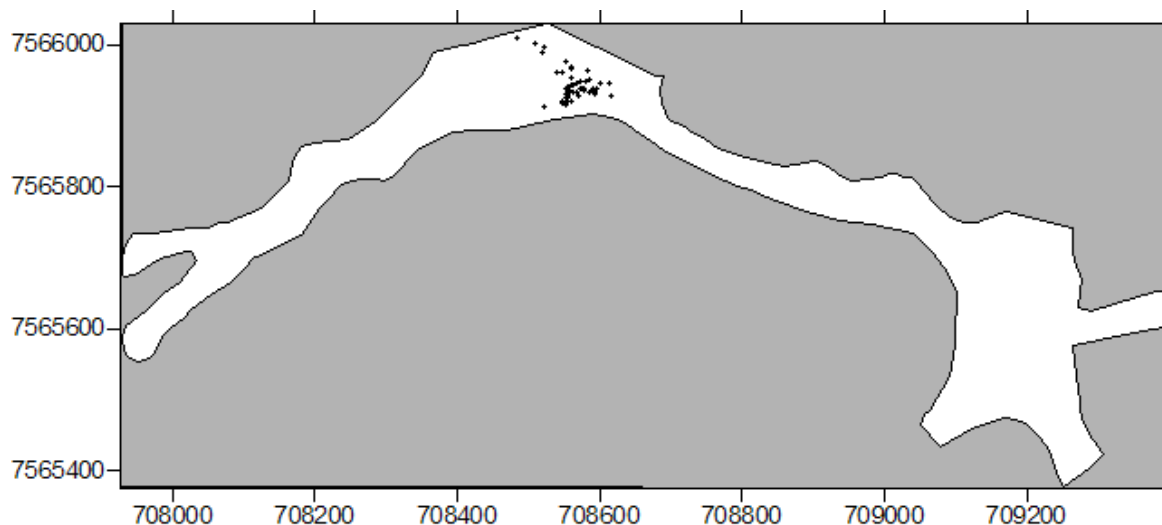


FIGURA 2.20
UM DIA DEPOIS DO LANÇAMENTO PARA SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE
PARTÍCULAS NO RESERVATÓRIO TOCAIA COM VAZÃO MÁXIMA

Ao final do quinto dia, das dez partículas lançadas, resta apenas uma, na região mostrada pelo ponto 1. Essa região é dominada por baixas velocidades, pois se encontra em um trecho entre a dominância do fluxo principal e das velocidades geradas pelas vazões afluentes pelo rio Tocáia. Após um período de aproximadamente dez dias, todas as partículas lançadas nessa localização do lago são capazes de atingir a saída do canal para o reservatório de Lourical.

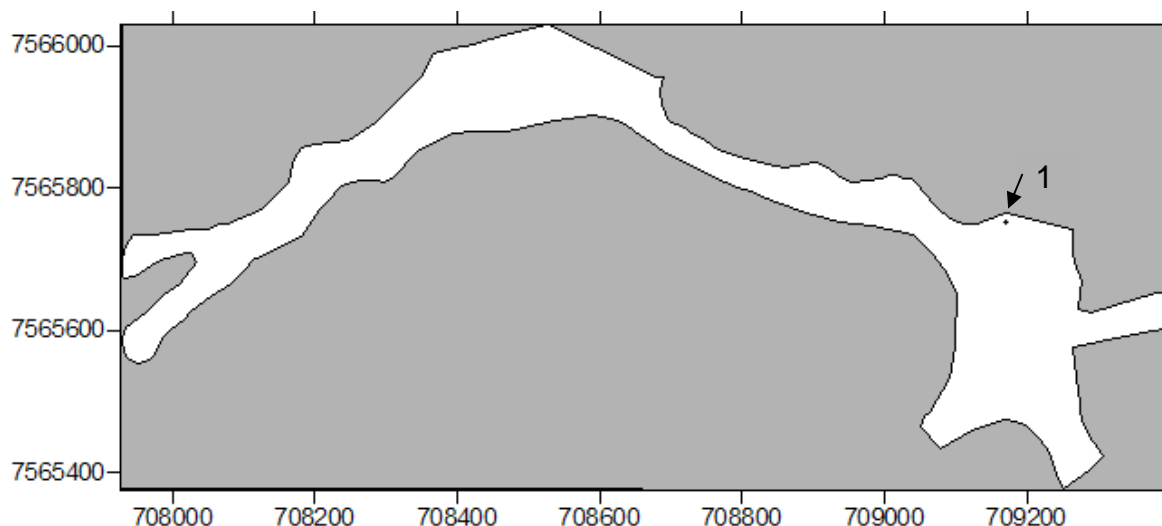


FIGURA 2.21
CINCO DIAS DEPOIS DO LANÇAMENTO PARA SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE
PARTÍCULAS NO RESERVATÓRIO TOCAIA COM VAZÃO MÁXIMA

b) Cenário de Estiagem

Na Figura 2.22, que mostra o comportamento hidrodinâmico com vazão mínima, percebe-se, além da esperada diminuição das velocidades em todo o reservatório (com máxima em torno de 0,3 m/s) em relação à simulação com vazão máxima, a permanência da recirculação e da influência das velocidades do canal principal no braço.

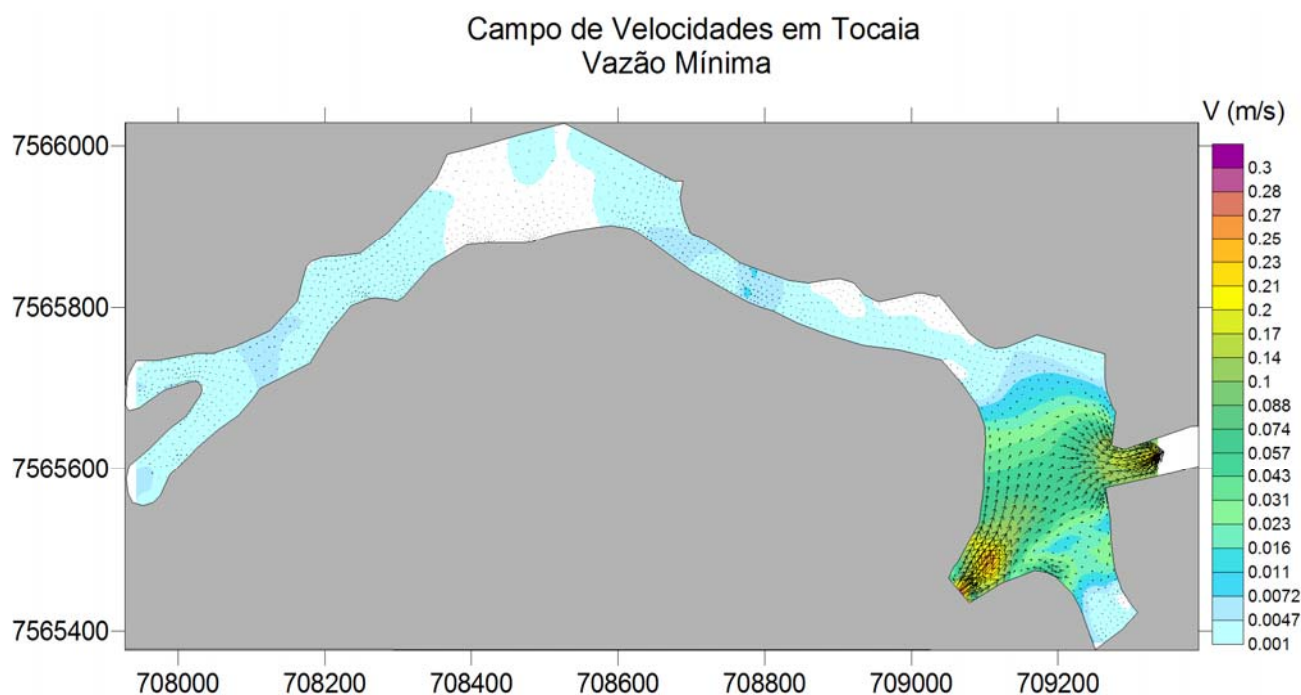


FIGURA 2.22
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO PARA O
RESERVATÓRIO TOCAIA COM VAZÃO MÍNIMA

Assim como para o cenário de cheia, para o cenário de estiagem também foi feita a simulação do transporte de partículas. As Figuras 2.23 e 2.24 mostram os resultados para um e oito dias respectivamente. Percebe-se, como esperado, que com as velocidades menores para esse cenário as partículas levam um maior tempo para percorrer o primeiro trecho do braço formado pelo rio Tocaia. Apesar disso, após oito dias algumas das partículas já deixaram o reservatório. Após um período de aproximadamente quinze dias, todas as partículas lançadas nessa localização do lago são capazes de atingir a saída do canal para o reservatório de Louriçal. Por esse motivo, considerou-se que o tempo de residência nesse trecho do lago não é capaz de comprometer substancialmente a qualidade da água e, assim, não se faz necessária a implantação de diques ou outras estruturas que melhorem a circulação da água no braço do reservatório.

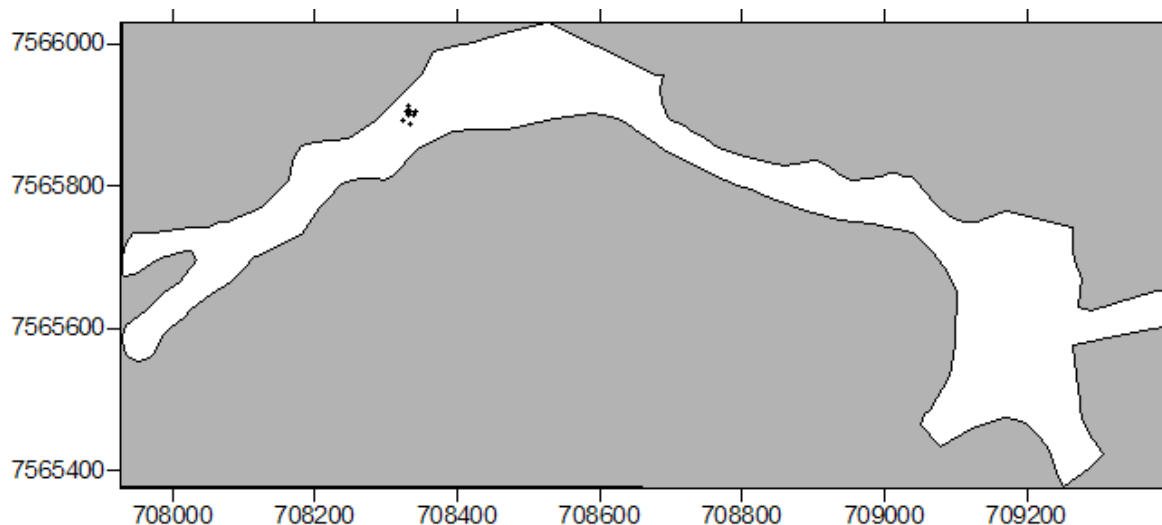


FIGURA 2.23
UM DIA DEPOIS DO LANÇAMENTO PARA SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE
PARTÍCULAS NO RESERVATÓRIO TOCAIA COM VAZÃO MÍNIMA

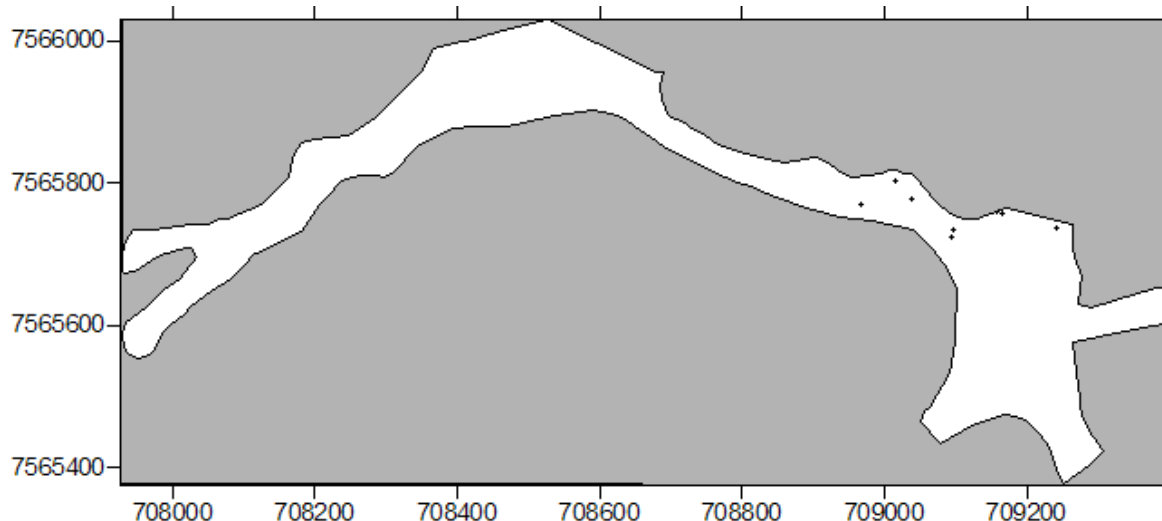


FIGURA 2.24
OITO DIAS DEPOIS DO LANÇAMENTO PARA SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE
PARTÍCULAS NO RESERVATÓRIO TOCAIA COM VAZÃO MÍNIMA

2.3.5 - Reservatório de Lourical

O reservatório de Lourical é o terceiro da cascata do AHE Simplício. Seu contorno na cota de inundação apresenta dois tributários cujos cursos d'água são de Norte para Sul, relativamente longos em relação ao canal principal.

Uma vez que a vazão que escoar no canal principal é ordens de grandeza maior que a vazão que escoar pelos tributários, o fluxo principal atua como um controle natural das descargas dos tributários. Este é um fator negativo para as condições de qualidade da água nos tributários de Lourical porque a água estagnada é um ambiente favorável para o crescimento de algas.

Visando solucionar este problema foram planejadas duas estruturas de controle hidráulico na foz de cada um dos tributários de Louriçal, conforme indicado na Figura 2.25, para simulação hidrodinâmica deste reservatório em condições de cheia e estiagem.

Essas estruturas serão diques construídos com material proveniente dos bota-foras, cujas seções típicas são apresentadas na Figura 2.26.

a) Cenário de Cheia

O reservatório de Louriçal é composto por duas regiões distintas de campo de velocidade para o cenário de vazão máxima, o qual consistiu em forçar o modelo com uma vazão de $342 \text{ m}^3/\text{s}$ na entrada principal e $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ em cada um dos tributários. A região mais intensa, que apresenta velocidades máximas da ordem de $0,8 \text{ m/s}$, tem início na extremidade inferior do domínio (Figura 2.25), e termina com a retirada deste fluxo para o reservatório de Calçado, no ponto indicado pela seta azul nessa figura. A outra região, com regime de circulação menos intensa, domina os dois braços do reservatório. O braço esquerdo, referente ao leitor, possui extensão pouco superior a $3\,500$ metros, e o direito possui um comprimento da ordem de $1\,400$ metros. O fluxo gerado pela descarga de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, máxima vazão apresentada pelos tributários, gerou máximas velocidades da ordem de $0,15 \text{ m/s}$.

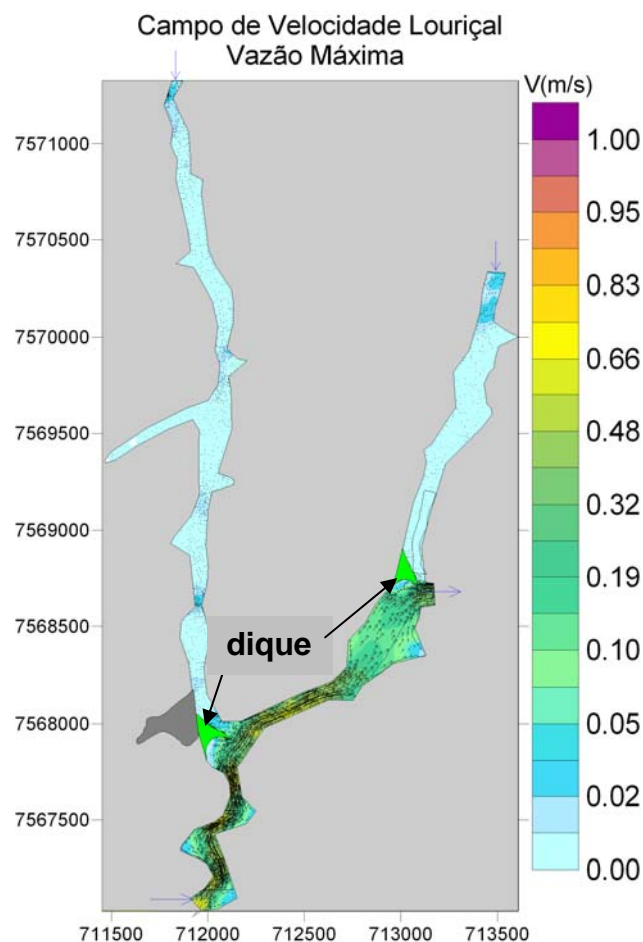


FIGURA 2.25
CAMPO DE VELOCIDADE NO RESERVATÓRIO LOURIÇAL COM VAZÃO MÁXIMA

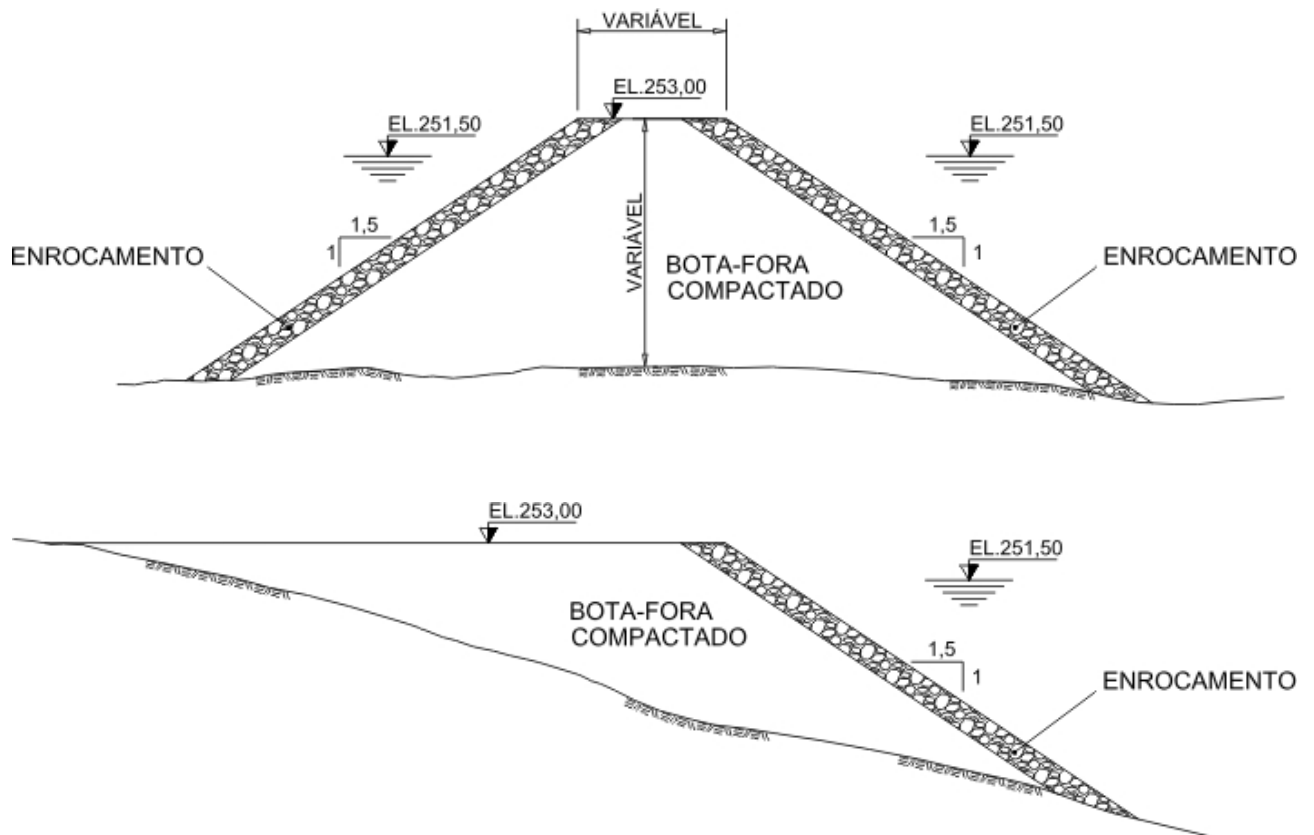


FIGURA 2.26
SEÇÕES TÍPICAS DOS DIQUES

A Figura 2.27 mostra o comportamento de um traçador passivo lançado nas extremidades de cada um desses braços. Este tipo de simulação foi elaborado para determinação de pontos de recirculação e possíveis estagnações do fluxo.



FIGURA 2.27
POSIÇÃO DOS TRAÇADORES EM LOURIÇAL
APÓS 1 HORA DO LANÇAMENTO

Após uma hora do lançamento o grupo de partículas traçantes deslocou-se com o fluxo gerado pela descarga dos tributários. A Figura 2.28 apresenta a posição das partículas a 24 horas do lançamento. Para este instante, observa-se um deslocamento aproximado de 1 km do ponto de lançamento.

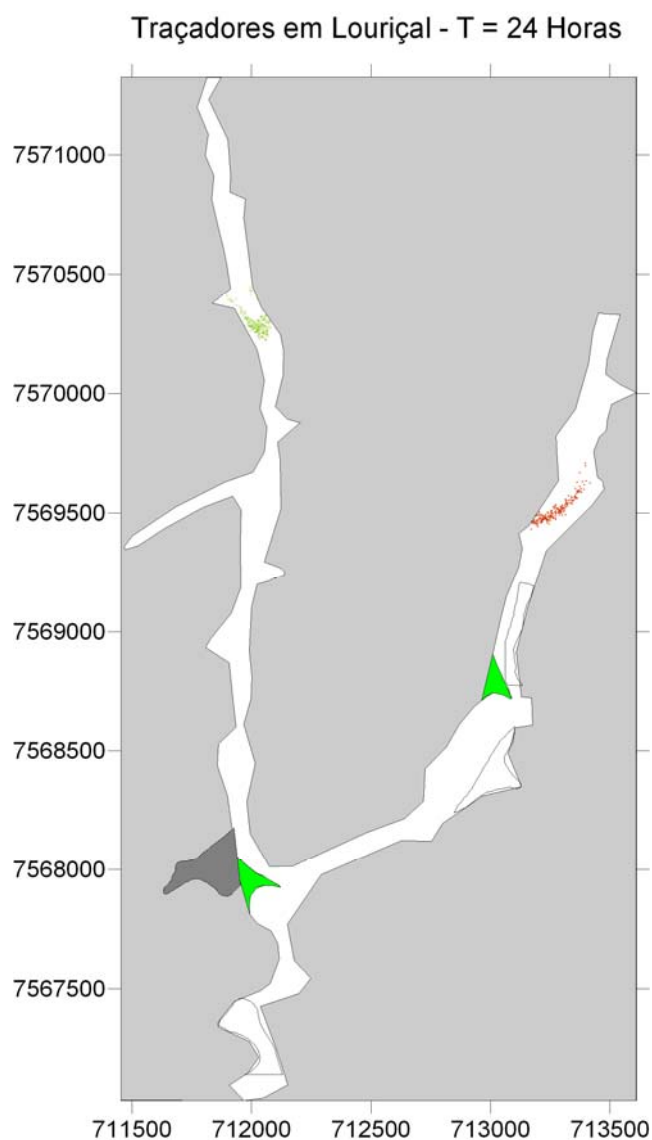


FIGURA 2.28
POSIÇÃO DOS TRAÇADORES EM LOURIÇAL
APÓS 24 HORAS DO LANÇAMENTO

Para $t = 72$ horas (Figura 2.29) do lançamento as das partículas do grupo do braço direito já iniciaram a saíram do reservatório e as do braço direito deslocaram-se uma distância aproximada de 3 km e aproximam-se da região de maiores e mais intensos fluxos. Como pode ser observado na Figura 2.30 o tempo necessário para a grande maioria das partículas serem expulsas dos braços do reservatório de Louriçal é da ordem de 120 horas no cenário de vazão máxima.

Traçadores em Louriçal - T = 72 Horas



FIGURA 2.29
POSIÇÃO DOS TRAÇADORES EM LOURIÇAL
APÓS 72 HORAS DO LANÇAMENTO

Este tipo de análise mostra que em nenhum dos braços existem regiões de recirculação capazes de reter partículas traçadoras por períodos superiores a dez dias. Em situações mais realistas, fazendo analogia entre o comportamento dessas partículas com entidades como os coliformes, ou qualquer outra substância que possa vir a interferir na qualidade da água do reservatório, é possível conjecturar que em situações de vazão máxima o reservatório de Louriçal não apresenta áreas de estagnação que possam vir a apresentar degradação acentuada da qualidade de suas águas. É claro que somente uma

modelagem mais criteriosa dos principais parâmetros da qualidade da água desse reservatório será capaz de apresentar argumentos mais contundentes a esse respeito.

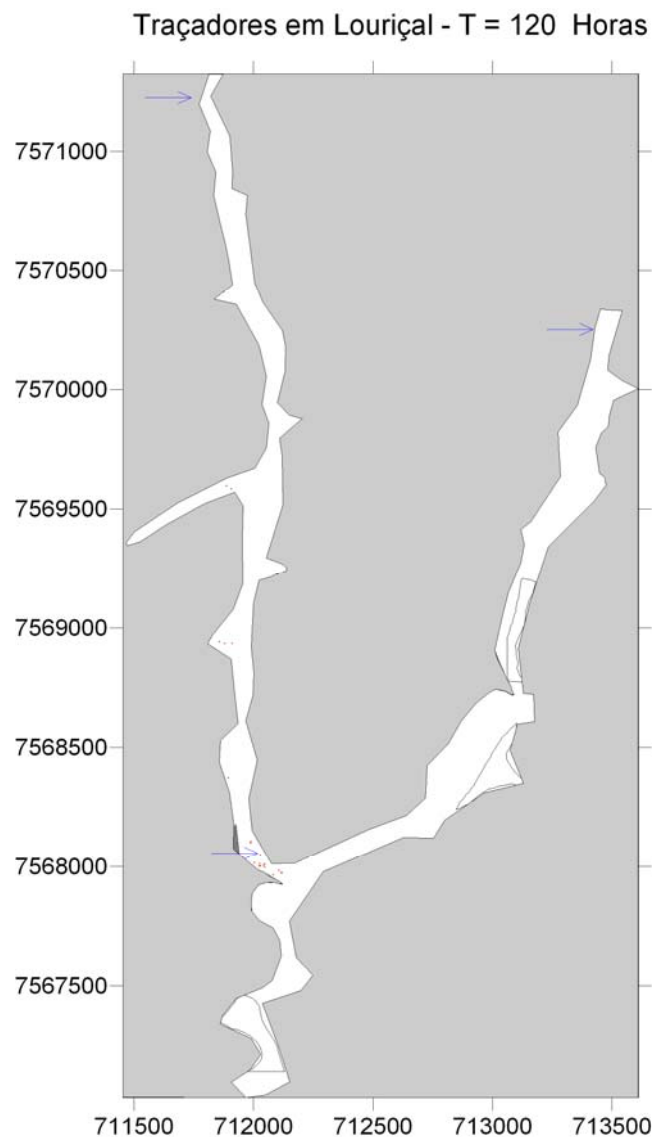


FIGURA 2.30
POSIÇÃO DOS TRAÇADORES EM LOURIÇAL
APÓS 120 HORAS DO LANÇAMENTO

A Figura 2.31 mostra em detalhes o campo de velocidade na região da estrutura criada para simular uma barreira que evite a invasão do fluxo principal para o interior do braço esquerdo do reservatório. Esta barreira foi criada com o principal objetivo de simular uma estrutura hidráulica capaz de preservar as características da massa de água dos tributários, através do seu isolamento do corpo de água principal de maior fluxo. Analisando com mais detalhes (Figura 2.32), pode-se observar que a estrutura, além de não permitir a intrusão das águas do fluxo principal, promove uma região de intensificação do fluxo da região localizada entre a margem esquerda do reservatório e a parede do

defletor hidráulico, causando um aumento das velocidades do tributário em direção ao corpo d'água principal.

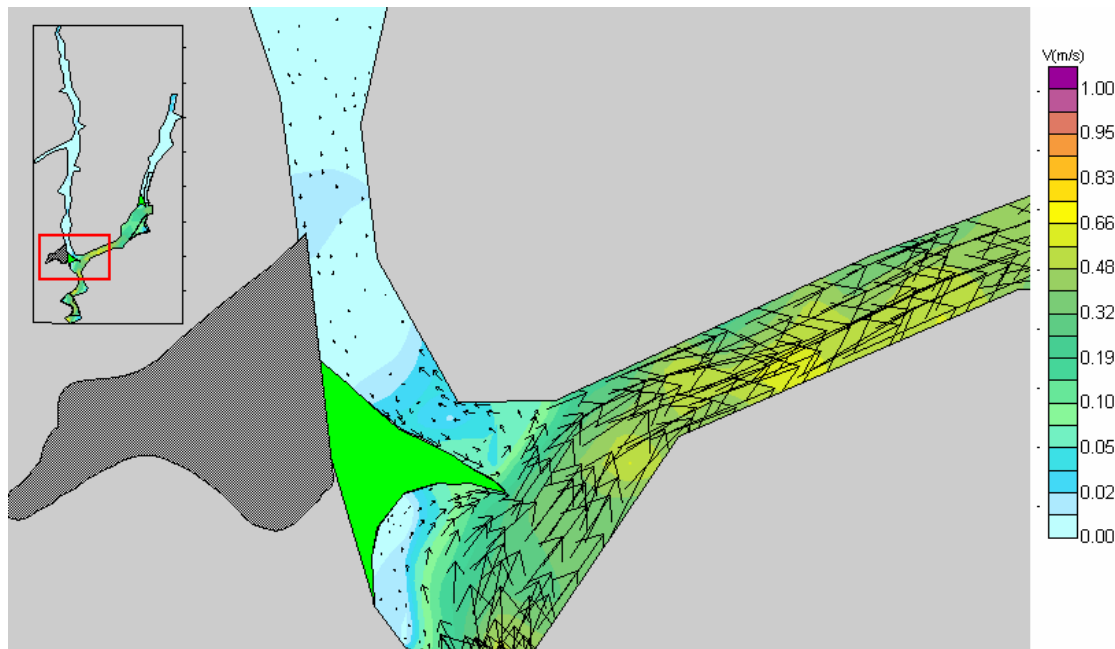


FIGURA 2.31
CAMPO DE VELOCIDADE NA REGIÃO DO BOTA FORA
BRAÇO ESQUERDO DO RESERVATÓRIO

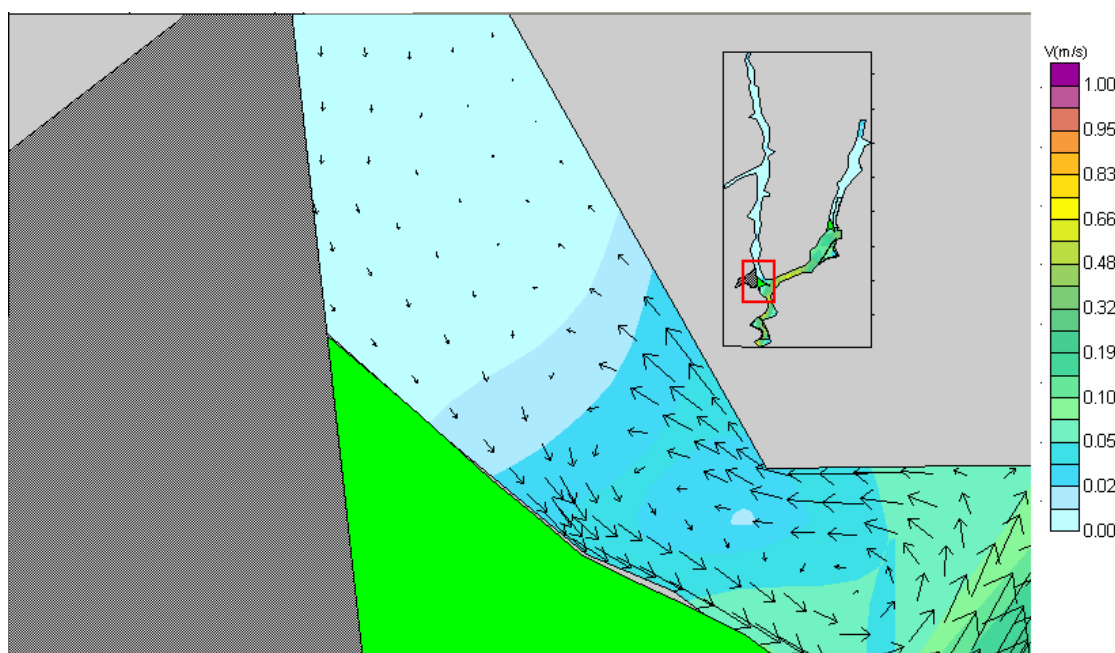
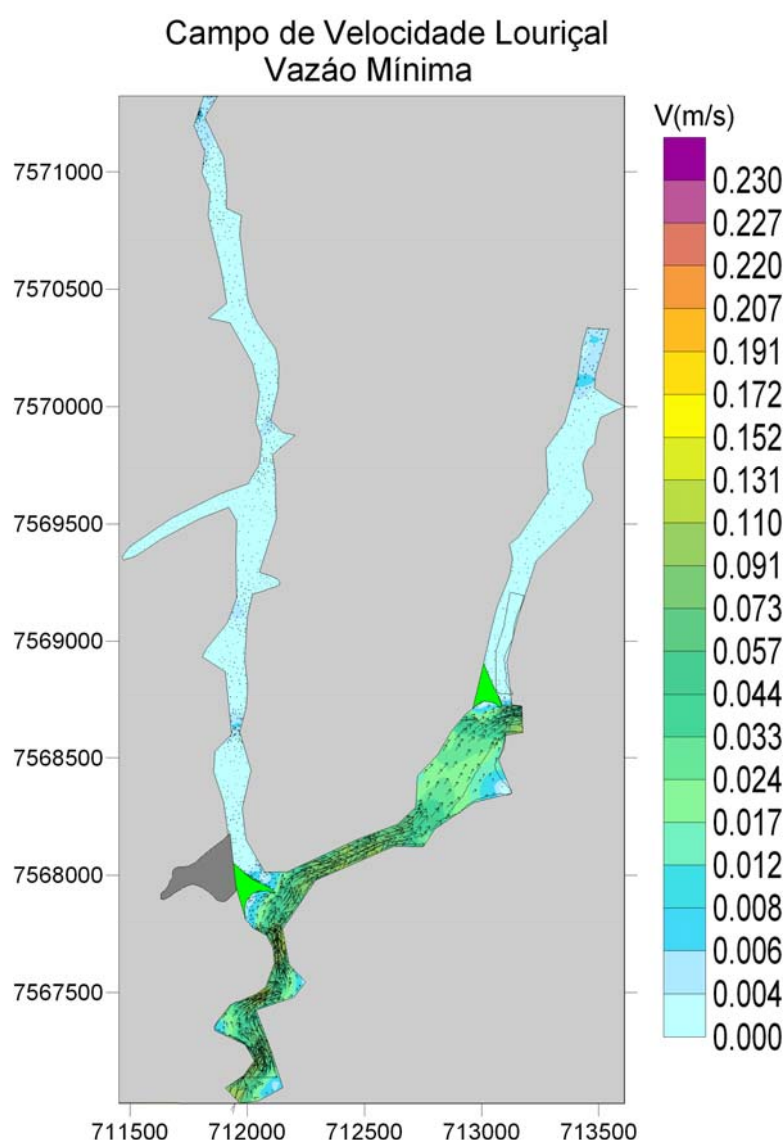


FIGURA 2.32
CAMPO DE VELOCIDADE NA REGIÃO DO BOTA FORA
BRAÇO ESQUERDO DO RESERVATÓRIO

b) Cenário de Estiagem

De forma análoga ao cenário de vazão máxima, a circulação dentro do reservatório de Louriçal divide-se em duas regiões distintas: uma área com circulação mais intensa e áreas com regime de velocidades menos intenso. Neste cenário, as velocidades máximas observadas não foram superiores a 0,20 m/s. As mínimas, localizadas nas regiões de baixa circulação, apresentaram valores da ordem de 0,005 m/s (ver Figura 2.33). É interessante notar que a utilização do material de bota fora, no aterramento da região destacada em cinza escuro do braço esquerdo, promoveu a eliminação de uma área com geometria favorável a apresentar recirculação do fluxo e possível degradação da qualidade da água.



**FIGURA 2.33
CAMPO DE VELOCIDADE NO RESERVATÓRIO
LOURIÇAL PARA VAZÃO MÍNIMA**

Devido às baixas velocidades obtidas com as simulações do cenário de mínima vazão, os experimentos com traçadores mostraram um tempo de permanência das partículas muito superior aos anteriores. A Figura 2.34 mostra a posição do grupo de traçadores após dez dias do lançamento, onde é possível observar que ambos os braços do reservatório ainda contêm todas as partículas lançadas.

Traçadores Passivos em Louriçal - T= 10 Dias

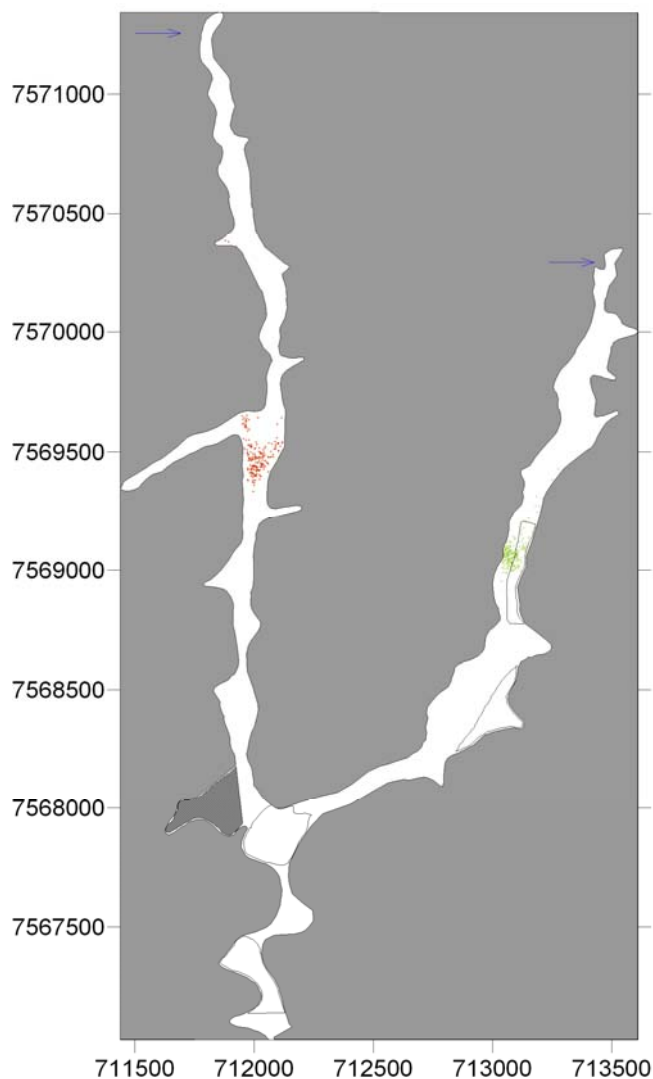


FIGURA 2.34
POSIÇÃO DOS TRAÇADORES EM LOURIÇAL
COM 10 DIAS DO LANÇAMENTO

Para o período de 20 dias observa-se que o grupo de partículas do braço direito foi expelido do domínio e o grupo do braço esquerdo atingiu a região de circulação mais intensa e se desloca para a saída do reservatório (Figura 2.35).

Traçadores Passivos em Louriçal - T= 20 Dias

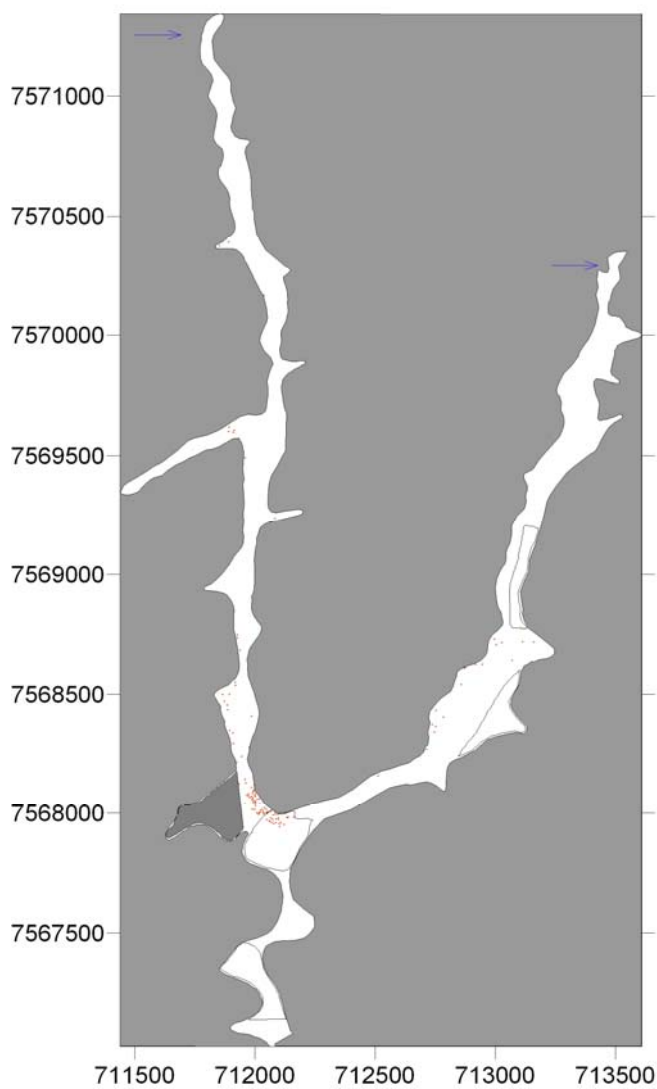


FIGURA 2.35
POSIÇÃO DOS TRAÇADORES EM LOURIÇAL
COM 20 DIAS DO LANÇAMENTO

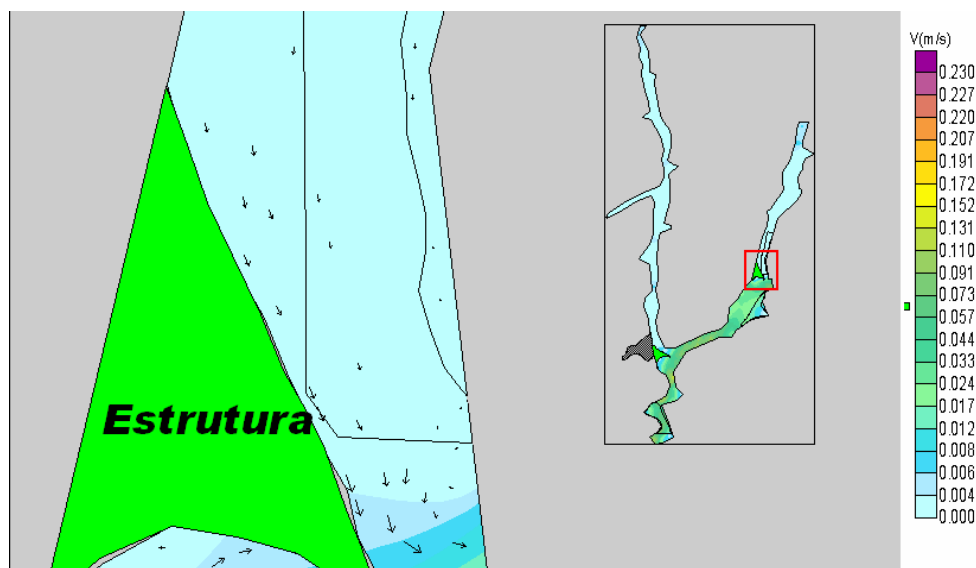


FIGURA 2.36
CAMPO DE VELOCIDADE NA REGIÃO DA ESTRUTURA HIDRÁULICA NO
RESERVATÓRIO LOURIÇAL – BRAÇO DIREITO DO RESERVATÓRIO

A intensificação do fluxo do braço direito do reservatório, devido ao estreitamento promovido pela estrutura hidráulica, pode ser observada na Figura 2.36. Velocidades da ordem de 0,004 m/s passam a apresentar valores da ordem de 0,006 m/s, o que promove deslocamentos mais intensos do fluxo de água do tributário em direção ao fluxo principal e também um barramento para as águas da região inferior do domínio. A circulação do braço esquerdo do reservatório na região do bota fora, para o cenário de vazão mínima, apresentou a mesma tendência de intensificação observada no cenário de vazão máxima, apresentada na Figura 2.32.

2.3.6 - Reservatório de Calçado

O reservatório de Calçado é o quarto do AHE Simplício, e para ele foram definidos dois cenários hidrológicos para simular a hidrodinâmica. O primeiro foi o cenário de cheia, em que foram consideradas as máximas vazões mensais afluentes ao reservatório (347,54 m³/s vindos do reservatório Louriçal e 2,48 m³/s dos tributários afluentes ao lago). O segundo foi o cenário de estiagem, em que foram consideradas as mínimas vazões mensais afluentes ao reservatório (57,94 m³/s vindos do reservatório Louriçal e 0,49 m³/s dos tributários afluentes ao lago).

a) Cenário de Cheia

O reservatório de Calçado apresenta dois trechos bem definidos e de características diferentes. O primeiro trecho, desde o começo até aproximadamente o meio do reservatório, é dominado por canais mais estreitos e velocidades mais altas, chegando a valores em torno de 0,85 m/s. No segundo trecho, as larguras das seções transversais do canal principal aumentam, fazendo com que as velocidades diminuam e sejam geradas áreas de velocidades menores em relação ao reservatório como um todo (ver pontos 1 e

2 da Figura 2.37). Espera-se, porém, que com a variação das vazões de entrada e conseqüentemente do nível do reservatório, essas regiões façam uma total troca do volume de água ali contido. Os pontos apontados pelos números 3 e 4 mostram dois bota-foras já planejados para esse reservatório. Dessa forma, houve mudanças no contorno do reservatório, eliminando regiões de baixa circulação ali existentes.

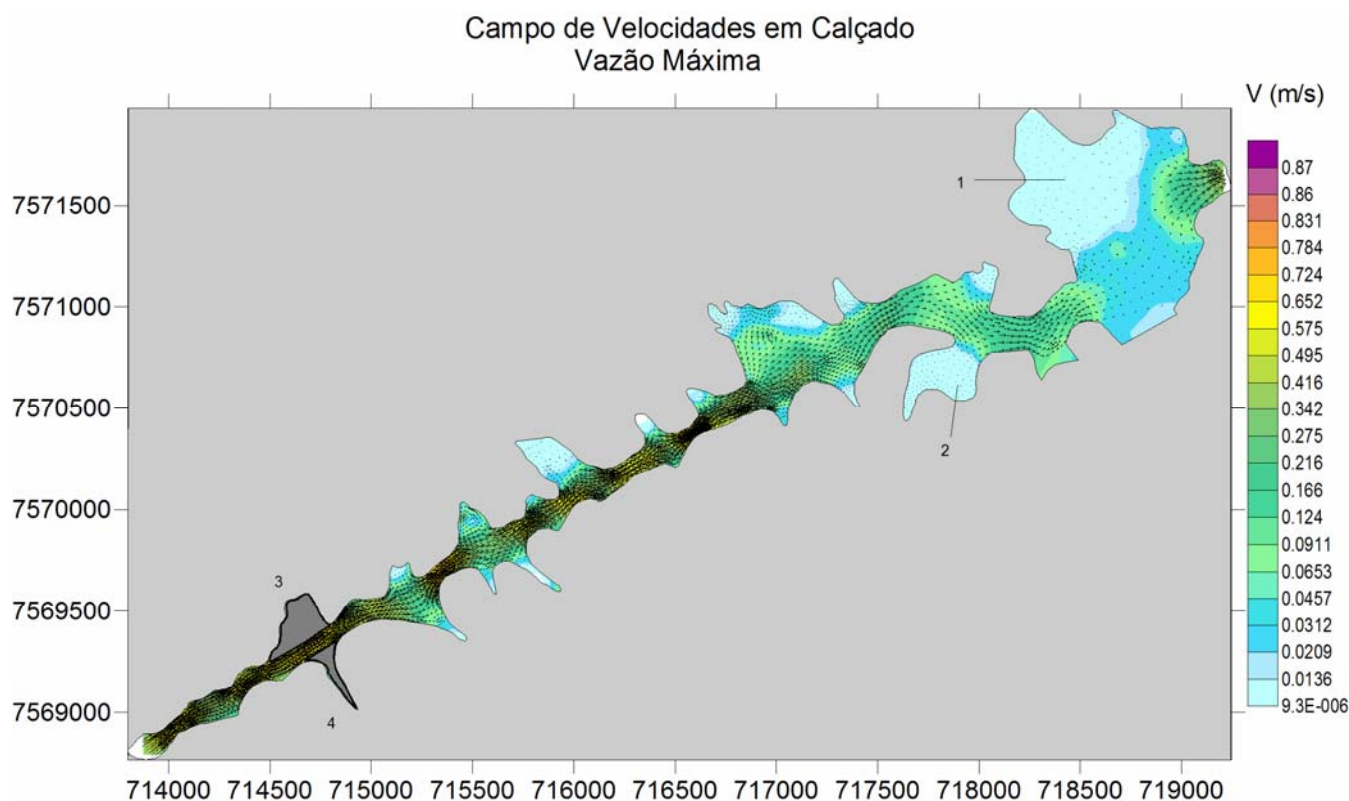


FIGURA 2.37
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO NO RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO MÁXIMA

A Figura 2.38 mostra (nos pontos 1 e 2) regiões de recirculação, causadas pela entrada de velocidades do canal principal nas duas reentrâncias em destaque. Porém, como não há para onde o fluxo continuar, ele acaba voltando ao canal principal após uma inversão de sua direção.

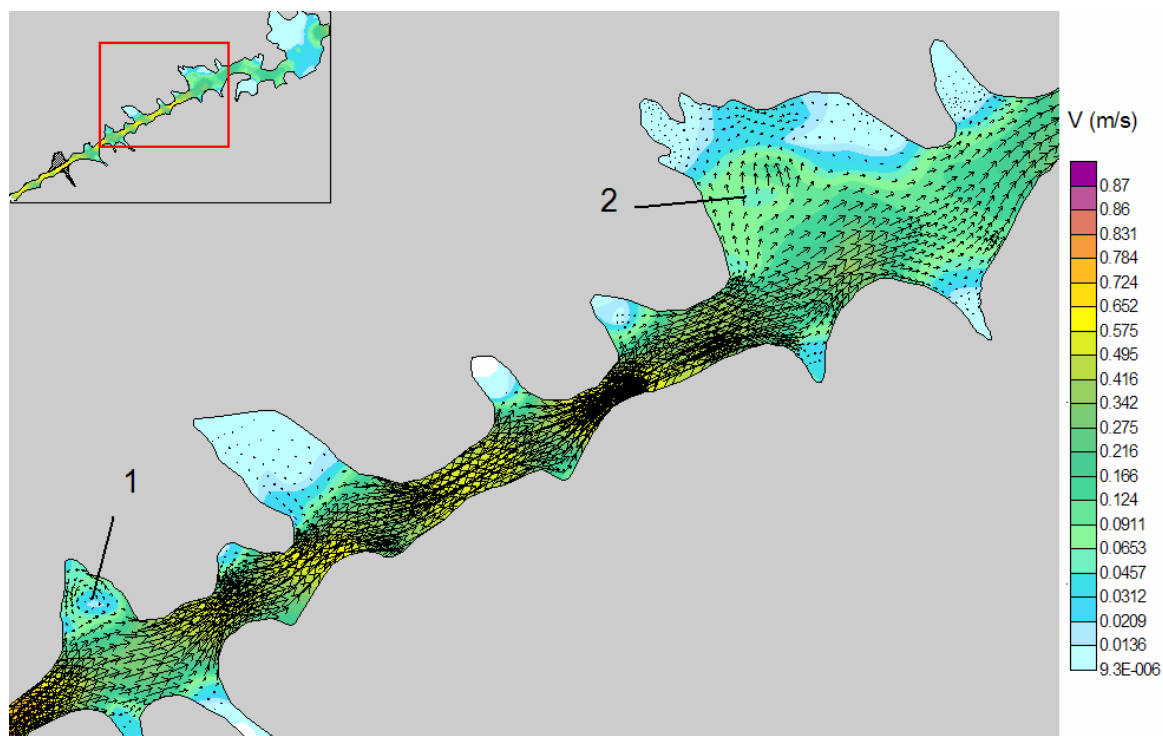


FIGURA 2.38
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO PARA UM TRECHO
DO RESERVATÓRIO CALÇADO COM VAZÃO MÁXIMA

b) Cenário de Estiagem

Quando são comparadas as Figuras 2.37 e 2.39 de vazões máxima e mínima respectivamente, percebe-se que para esse segundo caso (estiagem) as velocidades se tornaram bem menores, atingindo valores máximos em torno de 0,2 m/s. Porém, o comportamento geral dos reservatório para os dois cenários foi muito próximo em relação às regiões de baixa circulação.

Apesar da diminuição das velocidades no canal principal, as duas recirculações apontadas na Figura 2.38 do cenário de cheia ainda permaneceram para o cenário de estiagem.

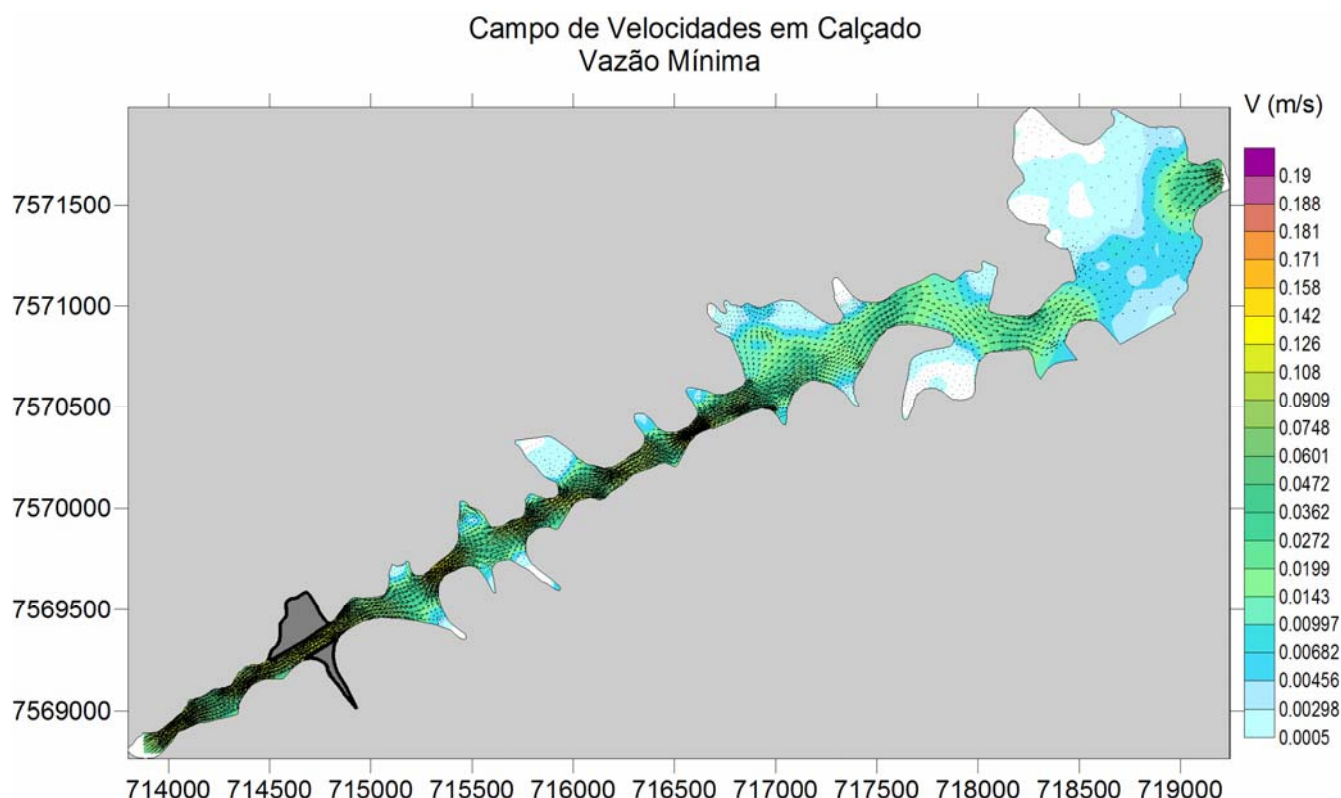


FIGURA 2.39
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO MÍNIMA

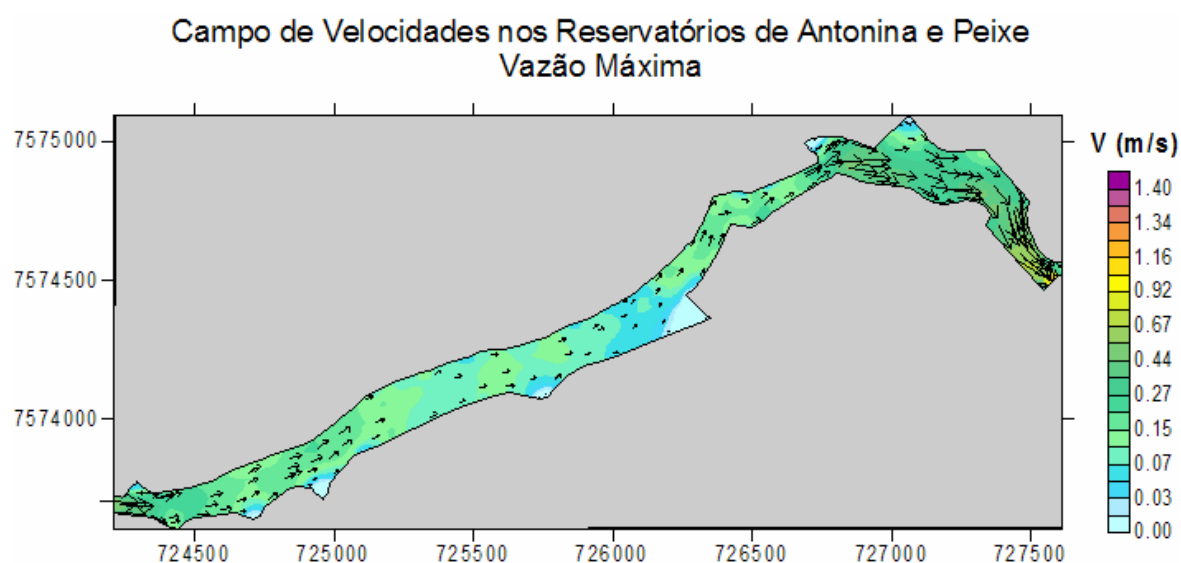
2.3.7 - Reservatórios de Antonina e Peixe

Os reservatórios de Antonina e Peixe, ilustrados na Figura 2.7, são os últimos do AHE Simplício e, portanto, suas vazões já foram regularizadas pela cascata de reservatórios à montante. Estes dois reservatórios são conectados por um canal de largura mínima da ordem de 70 m, o que provoca uma aceleração nas velocidades da corrente. Neste estudo os reservatórios de Antonina e Peixe foram simulados como um único domínio, visando caracterizar a influência sobre o comportamento hidrodinâmico e sobre a qualidade da água provocada pelo estrangulamento no canal que conecta os dois corpos hídricos.

Foram definidos dois cenários hidrológicos para simular a hidrodinâmica dos reservatórios de Antonina e Peixe. O primeiro foi o cenário de cheia, em que foram consideradas as máximas vazões mensais afluentes ao reservatório ($350,02 \text{ m}^3/\text{s}$ na entrada principal e $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$ na entrada do tributário ilustrado na Figura 2.40). O segundo foi o cenário de estiagem, em que foram consideradas as mínimas vazões mensais afluentes ao reservatório ($58,43 \text{ m}^3/\text{s}$ na entrada principal e $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ na entrada do tributário ilustrado na Figura 2.41).

a) Cenário de Cheia

O cenário de cheia produziu velocidades mais altas na saída do reservatório (chegando a 0,7 m/s), baixando para velocidades até 0,65 m/s na saída do canal de conexão e até 0,4 m/s no centro do reservatório. Em geral os braços do reservatório foram recirculados com velocidades que variam entre 0,02 e 0,04 m/s, conforme ilustrado na Figura 2.41. A Figura 2.40 ilustra o campo de velocidades dos reservatórios de Antonina e Peixe no cenário de cheia.



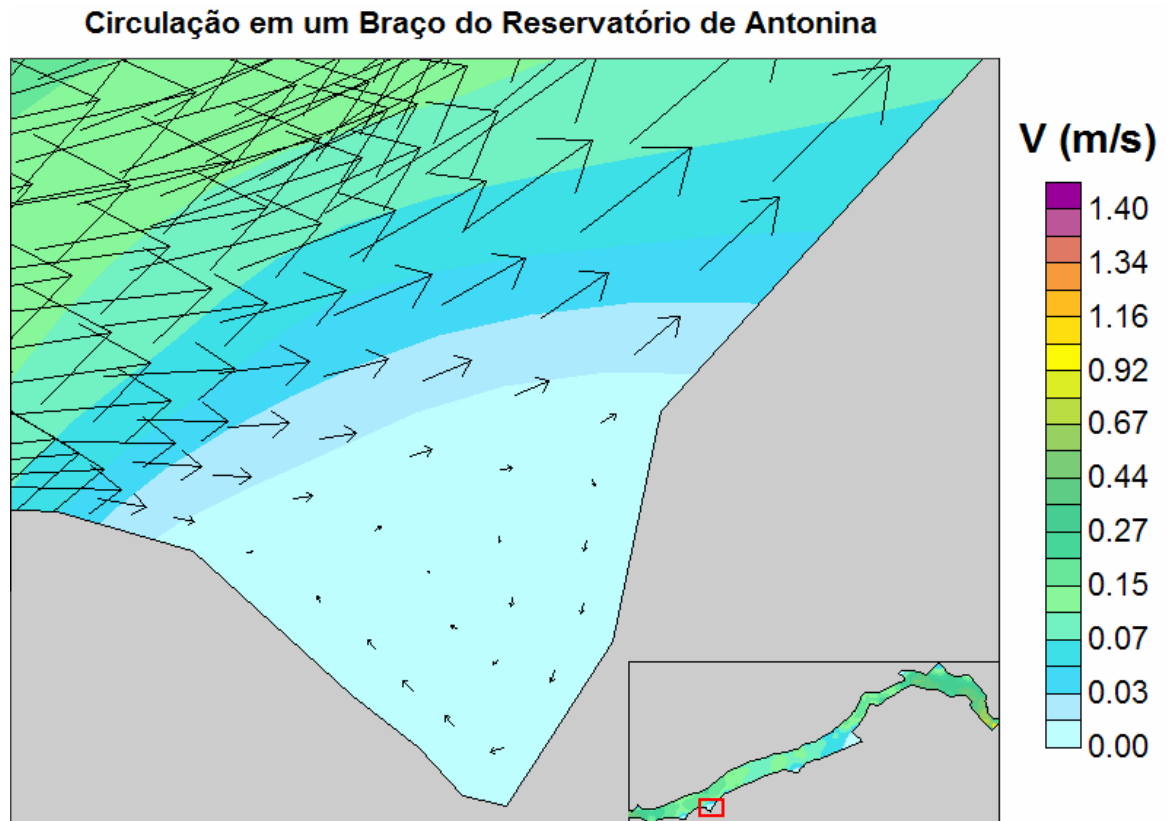


FIGURA 2.41
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO EM UM DOS BRAÇOS DO RESERVATÓRIO
DE ANTONINA COM CENÁRIO DE VAZÃO MÁXIMA

As velocidades relativamente mais altas no reservatório de Peixe, em relação ao reservatório de Antonina, ilustradas na Figura 2.40, devem-se principalmente à presença de bota-foras que restringem a profundidade da água a 7 m e à aceleração provocada pelo estrangulamento no canal de conexão entre ambos os reservatórios (Figura 2.42).

Detalhe das Velocidades na Saída do Canal de Conexão

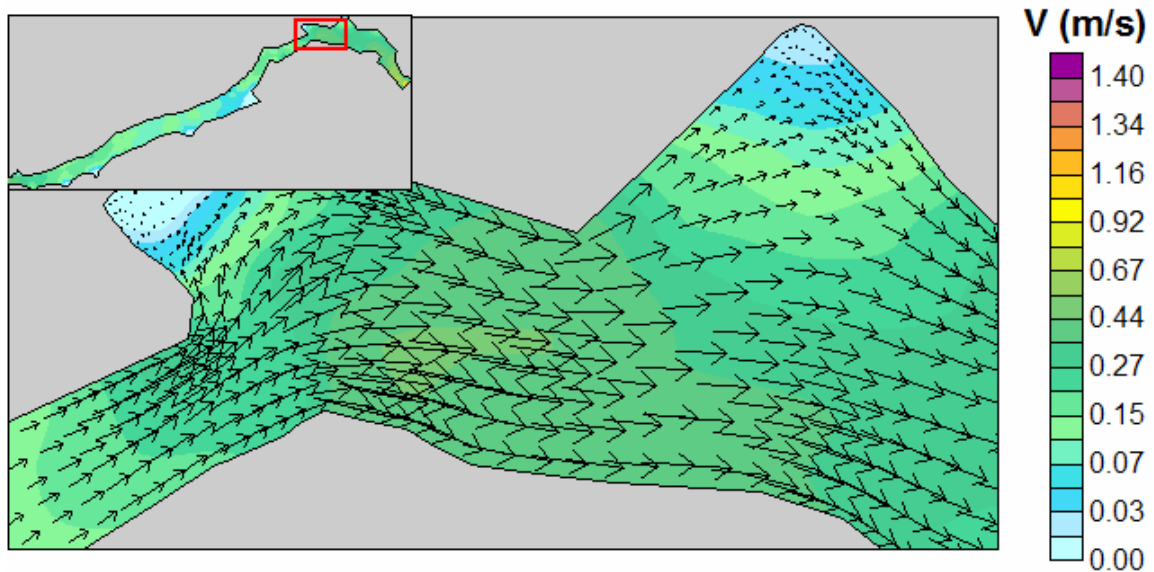


FIGURA 2.42

COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO NA SAÍDA DO CANAL DE CONEXÃO ENTRE OS RESERVATÓRIOS DE ANTONINA E PEIXE COM CENÁRIO DE VAZÃO MÁXIMA

b) Cenário de Estiagem

O cenário de estiagem produziu velocidades mais altas na saída do reservatório (chegando a 0,7 m/s), baixando para velocidades até 0,65 m/s na saída do canal de conexão e até 0,4 m/s no centro do reservatório. Em geral os braços do reservatório foram recirculados com velocidades que variam entre 0,02 e 0,04 m/s, conforme ilustrado na Figura 2.43.

Campo de Velocidades nos Reservatórios de Antonina e Peixe Vazão Mínima

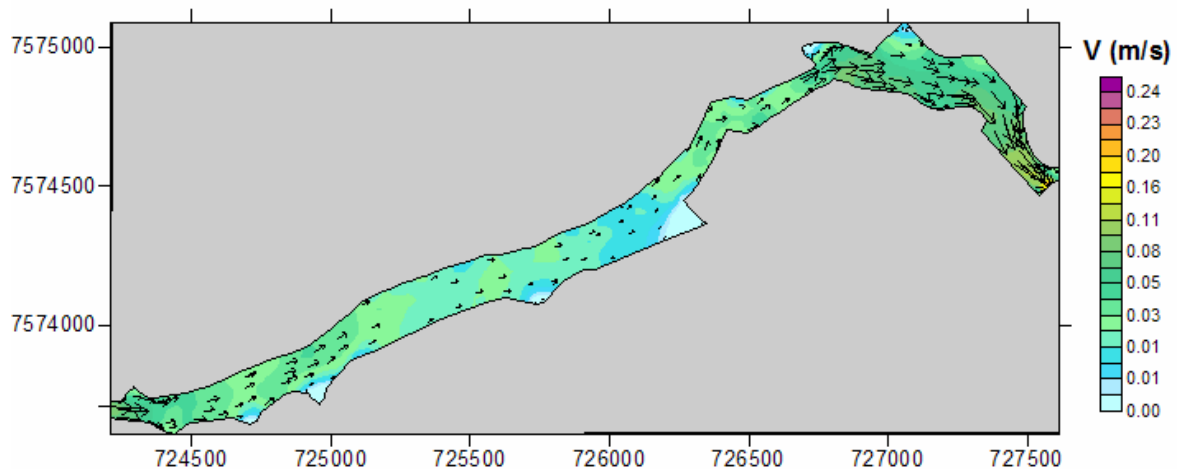


FIGURA 2.43

CAMPO DE VELOCIDADES NOS RESERVATÓRIOS DE ANTONINA E PEIXE COM CENÁRIO DE VAZÃO MÍNIMA

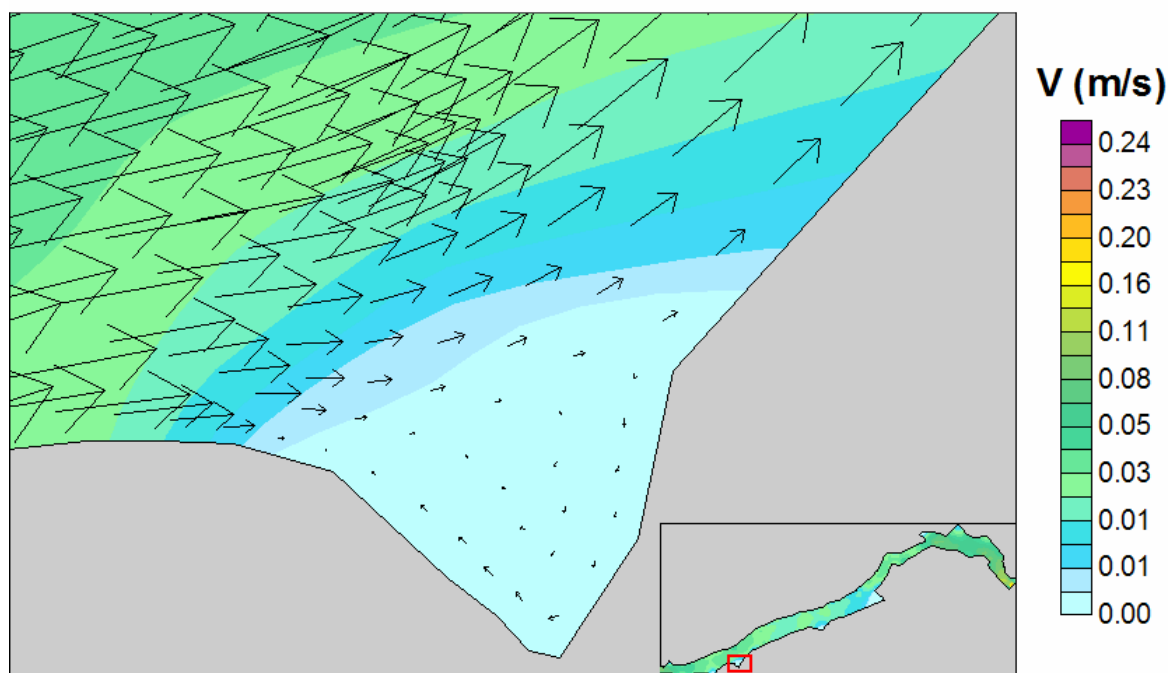
Circulação em um Braço do Reservatório de Antonina


FIGURA 2.44
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO EM UM DOS BRAÇOS DO RESERVATÓRIO
DE ANTONINA COM CENÁRIO DE VAZÃO MÍNIMA

Assim como no cenário de cheia, no cenário de estiagem foram observadas velocidades relativamente mais altas no reservatório de Peixe, em relação ao reservatório de Antonina, as quais estão ilustradas na Figura 2.43. Do mesmo modo que no cenário anterior, estas velocidades devem-se principalmente à presença de bota-foras que restringem a profundidade da água a 7 m e à aceleração provocada pelo estrangulamento no canal de conexão entre ambos os reservatórios (Figura 2.45).

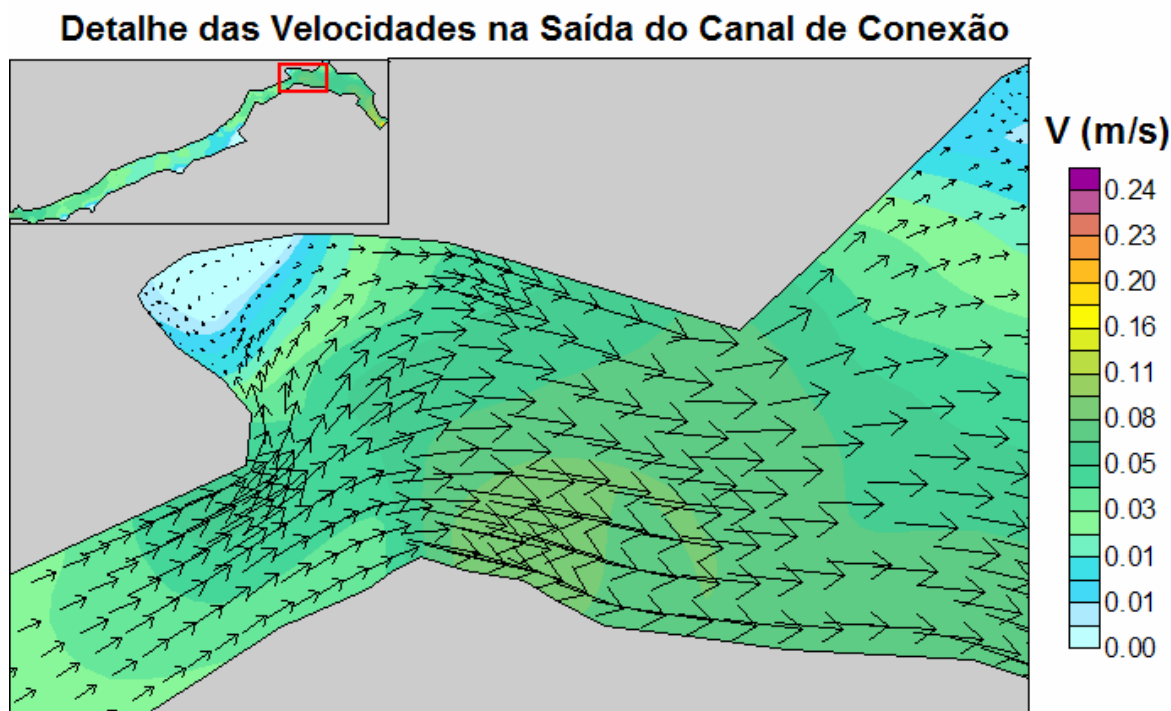


FIGURA 2.45
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO NA SAÍDA DO CANAL DE CONEXÃO ENTRE
OS RESERVATÓRIOS DE ANTONINA E PEIXE COM CENÁRIO DE VAZÃO MÍNIMA

2.4 - Cenários de Modelagem da Qualidade da Água

Um importante fato a ser destacado antes de serem apresentados os cenários de modelagem da qualidade da água, é o de que foram efetuadas simulações de situações críticas do ponto de vista do comprometimento da qualidade da água. Dessa forma, quando medições em um tributário de concentrações de DBO, por exemplo, apontavam valores abaixo de 2 mg/l (sem precisar o valor absoluto), o valor adotado foi o pior possível, ou seja, 2 mg/l.

Outro fato que deve ser mencionado é o de que o modelo utilizado não foi calibrado, ou seja, os resultados da modelagem não foram comparados com dados medidos dentro dos reservatórios. Tal operação é impossível considerando que os lagos ainda não foram formados. Assim, a modelagem está sendo usada como ferramenta de predição do estado da qualidade da água dos reservatórios, permitindo avaliações qualitativas.

As condições iniciais dentro do reservatório foram mantidas constantes para todos os cenários de tal forma que apenas os parâmetros de entrada foram modificados. Seguindo esse procedimento, torna-se viável a comparação entre os cenários de cheia e estiagem. Os parâmetros usados pelo modelo estão listados na Tabela 2.7, e corresponde a valores observados na literatura (CANU *et al.*, 2001 e SCHALODOW & HAMILTON, 1997).

As condições iniciais consideradas nas simulações encontram-se na Tabela 2.6.

TABELA 2.6
CONDIÇÕES INICIAIS CONSIDERADAS NA MODELAGEM DA
QUALIDADE DA ÁGUA DE TODOS OS RESERVATÓRIOS

TEMPERATURA (°C)	DBO (MG/L)	OD (MG/L)	NITRATO (MG/L)	AMÔNIA (MG/L)	FÓSFORO TOTAL (MG/L)
20	0	10,0	0	0	0

TABELA 2.7
COEFICIENTES DE QUALIDADE DE ÁGUA E SEUS VALORES UTILIZADOS NAS
SIMULAÇÕES DOS RESERVATÓRIOS DO AHE SIMPLÍCIO

SÍMBOLO	PARÂMETRO	UNIDADE
Θ_{12}	Coeficiente de temperatura para a nitrificação	1,08
Θ_{1R}	Coeficiente de temperatura para a respiração da biomassa.	1,045
Θ_{2D}	Coeficiente de temperatura para desnitrificação	1,045
Θ_{71}	Coeficiente de temperatura para a mineralização do nitrogênio orgânico	1,08
Θ_{83}	Coeficiente de temperatura para a mineralização do fósforo orgânico	1,08
Θ_a	Coeficiente de temperatura para a reaeração	1,024
Θ_D	Coeficiente de temperatura para a desoxigenação	1,047
Θ_s	Coeficiente de temperatura para o SOD	1,08
a_{nc}	Relação carbono-nitrogênio	0,25 mg N/mg C
a_{pc}	Relação carbono-fósforo	0,025 mg P/mg C
F_{D5}	Fração de DBO dissolvido na coluna de água,	0,5
f_{D7}	Fração de nitrogênio orgânico dissolvido na coluna de água	1,0
f_{D8}	Fração de fósforo orgânico dissolvido na coluna de água.	0,85
K_{12}	Coeficiente de nitrificação em 20°C	0,02 /dia
K_{2D}	Coeficiente de desnitrificação em 20°C	0,09 /dia
K_{71}	Coeficiente de mineralização do nitrogênio orgânico	0,03 /dia
K_{83}	Coeficiente de mineralização do fósforo orgânico	0,20/dia
K_a	Coeficiente de reaeração em 20°C	1,38 /dia
K_D	Coeficiente de desoxigenação em 20°C	0,005 /dia
K_{DBO}	Constante de meia saturação para oxidação da DBO	0,50 mg O ₂ /L
K_{mN}	coef. usado para calcular o PNH3	25,0 µg N/L
K_{NIT}	Constante de meia saturação para OD limitado pelo processo de nitrificação	2,0 mg O ₂ /L
K_{NO3}	Constante de meia saturação limitado pelo OD	0,1 mg N/L
SOD	Demanda de oxigênio no sedimento	1 g/mg dia
V_{S3}	Velocidade de deposição de substância orgânica	0,0 m/dia

2.4.1 - Reservatório de Anta

De acordo com as simulações hidrodinâmicas, foram simulados dois cenários de qualidade de água do reservatório de Anta: o cenário de cheia e o de estiagem. Nestes cenários foram especificados os valores de parâmetros de qualidade da água (DBO, OD,

nitrito, amônia, fósforo total) e a temperatura, apresentados na Tabela 2.8. Tais valores são provenientes das medições realizadas nos meses de maio e junho de 2006 e são apresentados nas Tabelas 2.3 e 2.4.

TABELA 2.8
CONDIÇÃO DE CONTORNO CONSIDERADA NO RESERVATÓRIO DE ANTA

	TEMPERATURA (°C)	DBO (MG/L)	OD (MG/L)	NITRATO (MG/L)	AMÔNIA (MG/L)	FÓSFORO TOTAL (MG/L)
Entrada do reservatório de Anta	22,00	2,0	4,35	0,40	0,06	0,06
Rio Macuco	19,45	2,4	7,37	0,20	0,01	0,03

a) Cenário de Cheia

Os resultados da simulação de qualidade da água do reservatório de Anta com cenário de vazões máximas mostraram uma estabilização da DBO em torno de 2,00 O₂ mg/L; as concentrações de OD variam entre 4,0 a 6,7 mg/L no canal principal do reservatório. Observando as distribuições espaciais das concentrações, nas Figuras 2.46 e 2.47, nota-se que as principais variações dos parâmetros (OD e DBO) ocorreram no leito do rio Macuco. Neste local, ocorreu a oxidação da matéria orgânica presente no rio Macuco (2,4 mg/L de DBO de entrada); a concentração de DBO reduziu para valores entre 2,04 e 2,19 mg/L próximo à sua foz no canal principal do reservatório de Anta. Em contra partida, as concentrações de OD na entrada do rio Macuco (7,37 mg/L) foram maiores que as concentrações de estabilização no canal principal. Estas se recuperaram após o trecho inicial, onde há o consumo de OD para oxidar a matéria orgânica proveniente do rio Macuco (ponto 1), até encontrarem a foz do rio Macuco, onde o OD é incorporado ao fluxo principal (ponto 2).

No canal principal do reservatório de Anta foi observado o incremento de montante para jusante das concentrações de OD, influenciado principalmente pelo processo de reaeração presente ao longo do intervalo de simulação. Já as concentrações de DBO mantiveram-se aproximadamente constantes na extensão do canal principal, sendo limitadas pela oxidação via consumo de OD e pelo baixo tempo de residência no reservatório com cenário de cheia (da ordem de 20 horas).

Oxigênio Dissolvido no Reservatório de Anta
Vazão Máxima

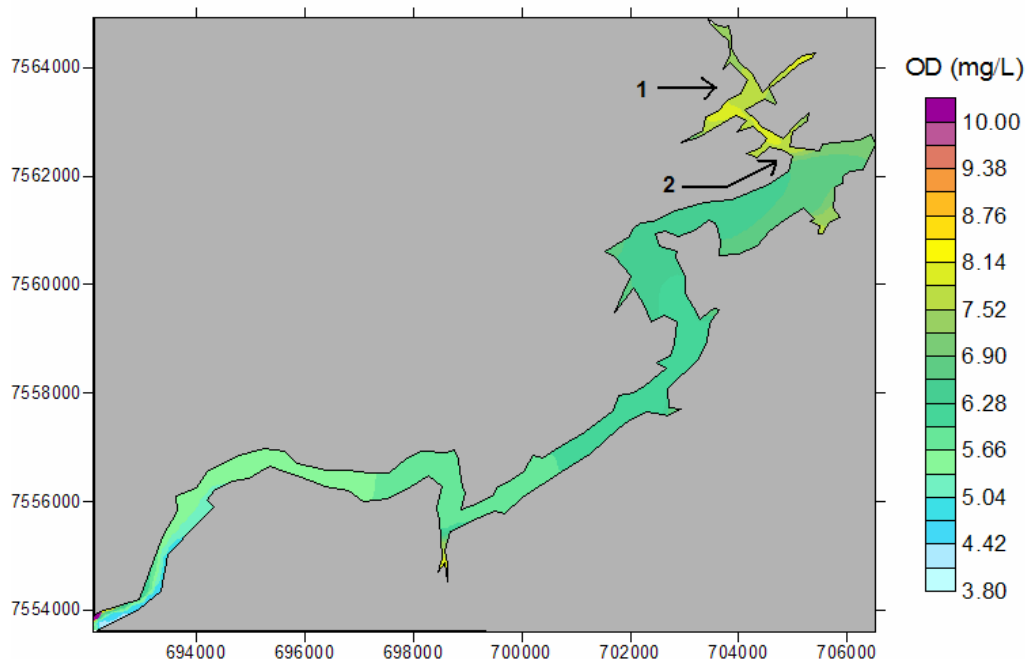


FIGURA 2.46
CONCENTRAÇÕES DE OD NO RESERVATÓRIO DE ANTA APÓS
A ESTABILIZAÇÃO DO CENÁRIO COM VAZÃO MÁXIMA

DBO no Reservatório de Anta
Vazão Máxima

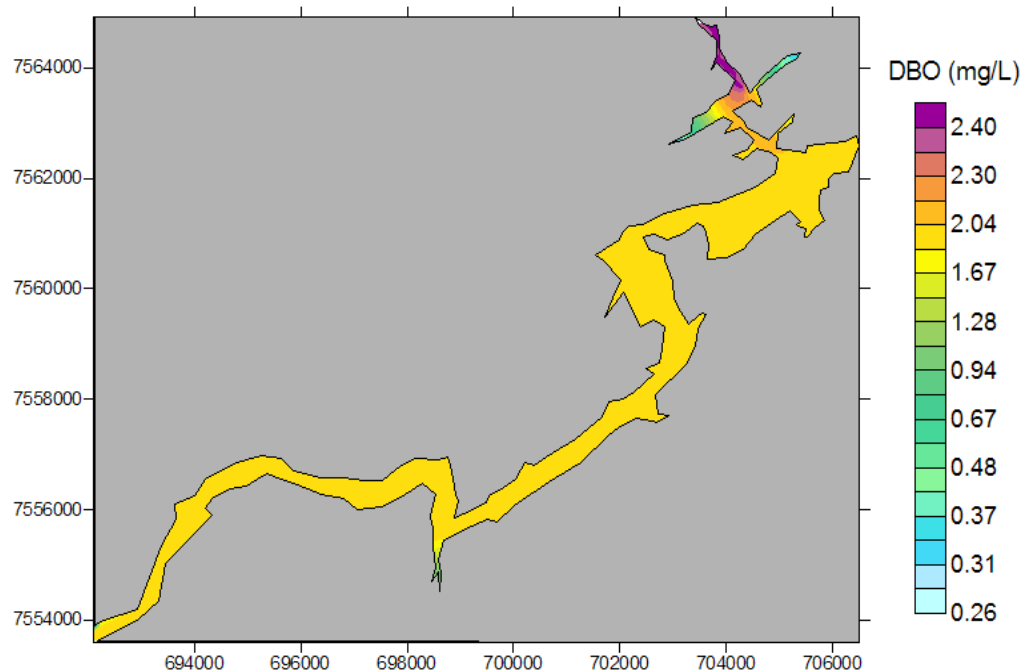


FIGURA 2.47
CONCENTRAÇÕES DE DBO NO RESERVATÓRIO DE ANTA APÓS A
ESTABILIZAÇÃO DO CENÁRIO COM VAZÃO MÁXIMA

As distribuições espaciais de amônia, nitrato e fósforo total se mostraram bastante semelhantes, conforme ilustram as Figuras 2.48 a 2.50, que indicam regiões coincidentes de concentrações máximas (ponto 1, aonde as concentrações de amônia, nitrato e fósforo total se estabilizaram em torno de 0,06 mg/L, 0,44 mg N /L e 0,06 mg P /L, respectivamente) e de concentrações mínimas (no leito do rio Macuco). O ponto 2 apresenta as menores concentrações destas substâncias, possivelmente devido ao processo dispersivo que ocorre nesta região.

A semelhança na distribuição espacial das concentrações de amônia, nitrato e fósforo deveu-se ao fato de que as distribuições destas substâncias ocorrem preferencialmente devido ao transporte advectivo-difusivo, com a parcela referente às reações cinéticas sendo de menor importância, uma vez que o tempo de residência para o cenário de cheias é da ordem de 20 horas.

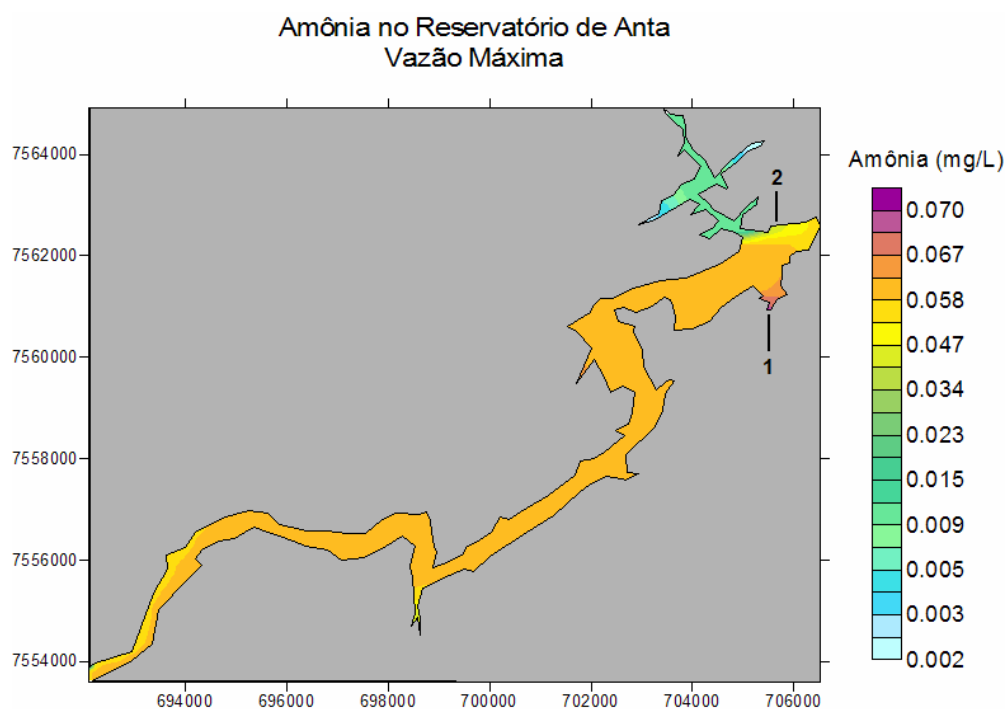


FIGURA 2.48
CONCENTRAÇÕES DE AMÔNIA NO RESERVATÓRIO DE ANTA APÓS A ESTABILIZAÇÃO DO CENÁRIO COM VAZÃO MÁXIMA

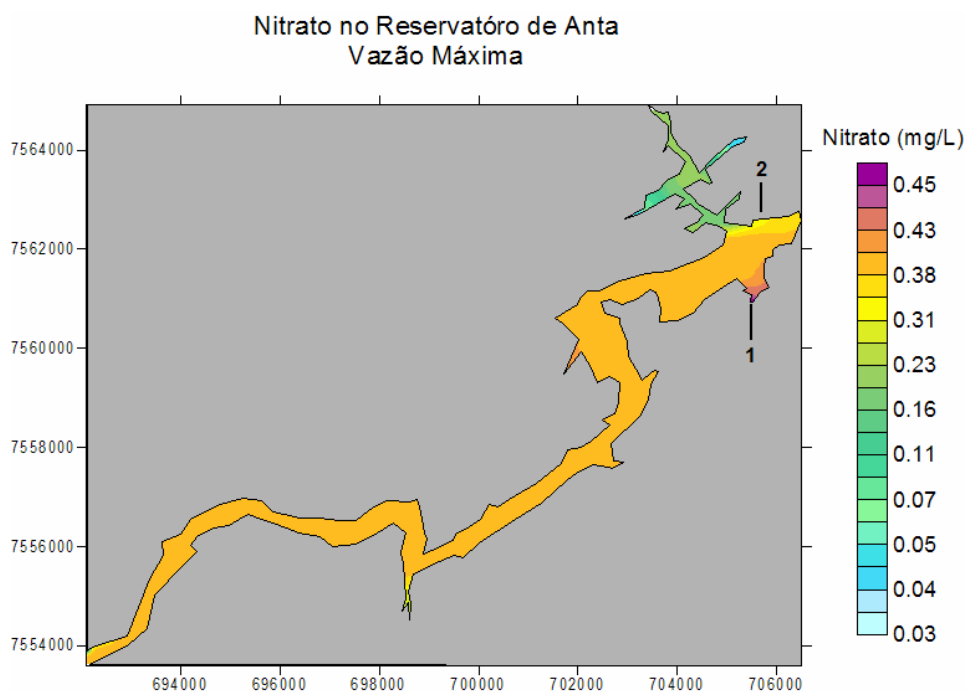


FIGURA 2.49
CONCENTRAÇÕES DE NITRATO NO RESERVATÓRIO DE ANTA APÓS A ESTABILIZAÇÃO DO CENÁRIO COM VAZÃO MÁXIMA

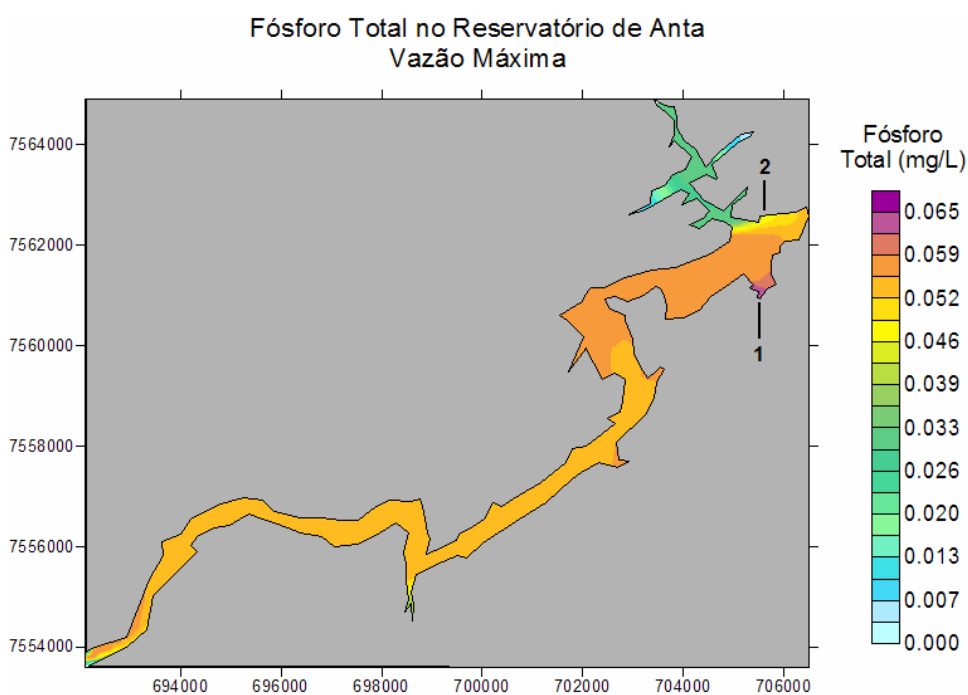


FIGURA 2.50
CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO TOTAL NO RESERVATÓRIO DE ANTA APÓS A ESTABILIZAÇÃO DO CENÁRIO COM VAZÃO MÁXIMA

b) Cenário de Estiagem

Os resultados da simulação de qualidade da água do reservatório de Anta com cenário de vazões de estiagem mostraram uma estabilização da DBO em torno de 2,00 mg/L, com concentrações de OD de 4,0 a 9,1 mg/L no canal principal do reservatório.

Ao observar na Figura 2.51 a distribuição das concentrações estabilizadas de OD no canal principal do reservatório de Anta, nota-se um incremento de valores em torno de 4,3 mg/L para valores em torno de 8,9 mg/L. Este aumento foi essencialmente propiciado pelo coeficiente de reaeração de 1,38 d⁻¹ associado ao tempo de residência em torno de oito dias no cenário de estiagem. Já as concentrações de DBO, ilustradas na Figura 2.52, mantiveram-se aproximadamente constantes na extensão do canal principal, sendo limitadas pela oxidação via consumo de OD.

A simulação da qualidade de água do reservatório de Anta no cenário de estiagem também mostrou uma maior degradação da matéria orgânica no rio Macuco (2,4 mg/L de DBO de entrada), chegando a valores entre 1,9 e 2,0 mg/L próximo à sua foz no canal principal do reservatório de Anta, provocada, também, pelo aumento do tempo de residência.

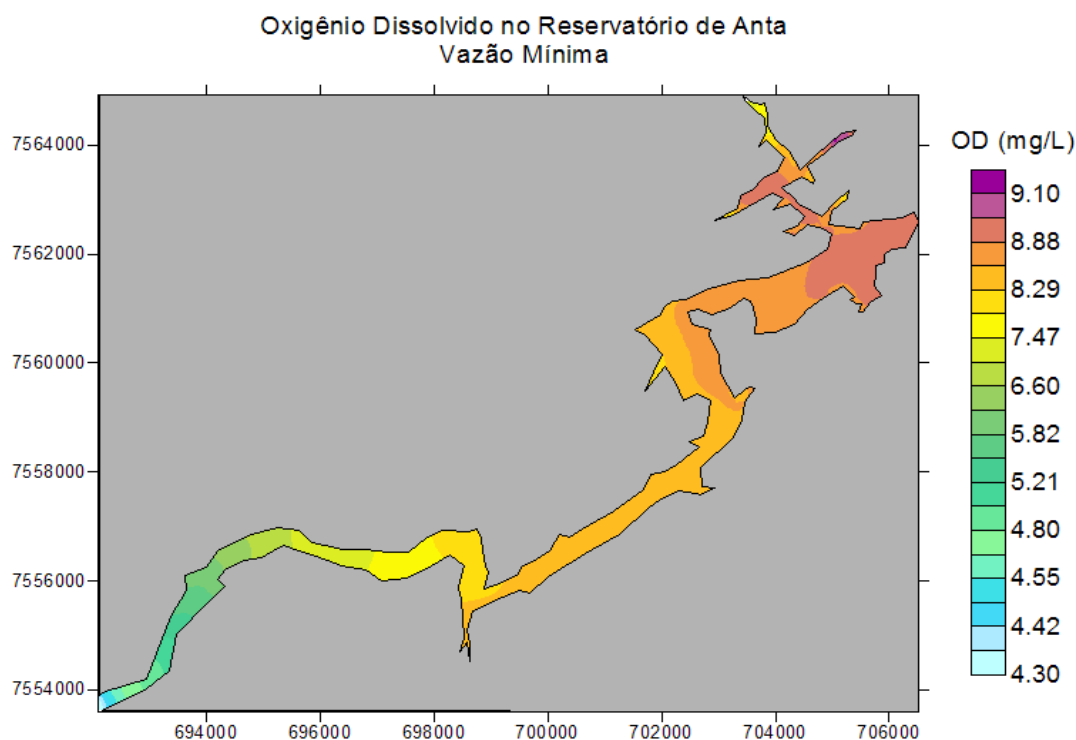


FIGURA 2.51
CONCENTRAÇÕES DE OD NO RESERVATÓRIO DE ANTA APÓS
A ESTABILIZAÇÃO DO CENÁRIO COM VAZÃO DE ESTIAGEM

DBO no Reservatório de Anta
Vazão Mínima

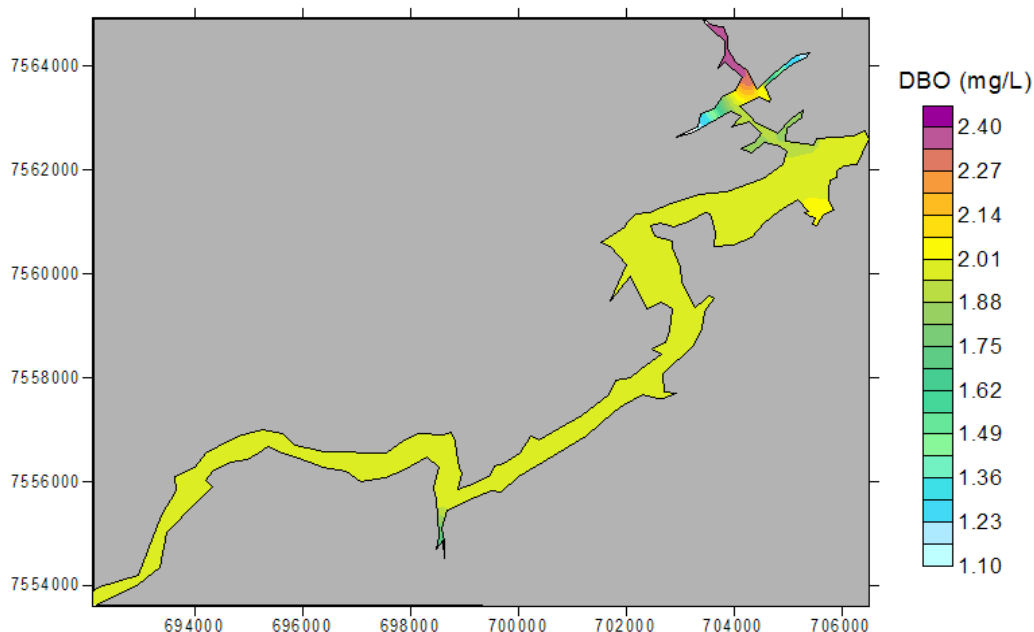


FIGURA 2.52
CONCENTRAÇÕES DE DBO NO RESERVATÓRIO DE ANTA APÓS A
ESTABILIZAÇÃO DO CENÁRIO COM VAZÃO DE ESTIAGEM

Assim como no cenário de cheia, as distribuições espaciais de amônia, nitrato e fósforo total se mostraram bastante semelhantes, conforme ilustram as Figuras 2.53 a 2.55, indicando regiões coincidentes de concentrações máximas (ponto 1, aonde as concentrações de amônia, nitrato e fósforo total se estabilizaram em torno de 0,07 mg/L, 0,5 mg/L e 0,076 mg/L, respectivamente) e de concentrações mínimas (no leito do rio Macuco). Note que no ponto 2 é possível observar a dispersão no canal principal das concentrações mais baixas destas substâncias, provenientes do rio Macuco.

Amônia no Reservatório de Anta
Vazão de Estiagem

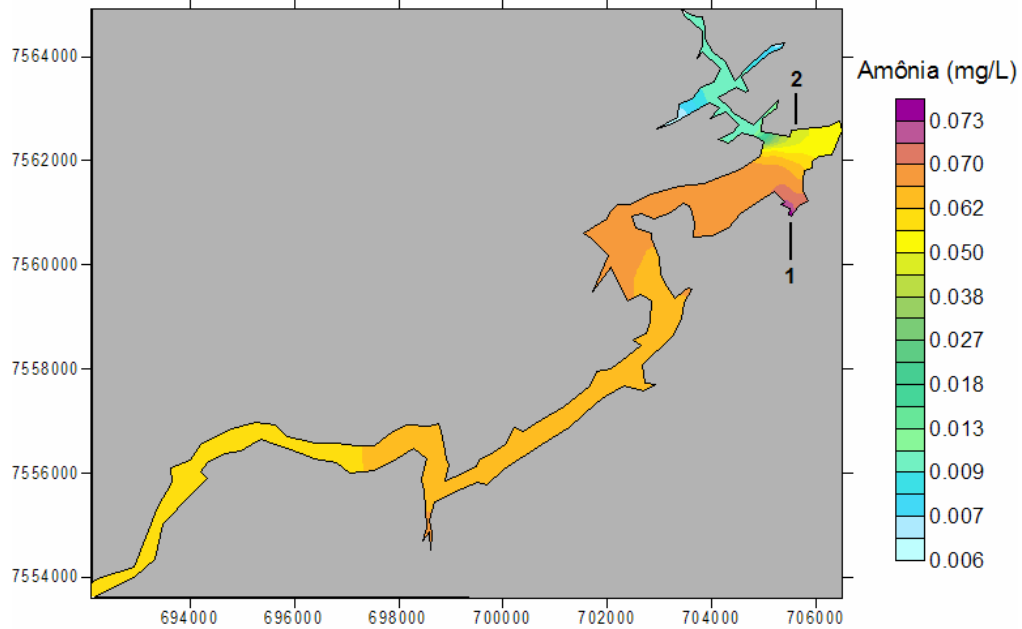


FIGURA 2.53
CONCENTRAÇÕES DE AMÔNIA NO RESERVATÓRIO DE ANTA APÓS A ESTABILIZAÇÃO DO CENÁRIO COM VAZÃO DE ESTIAGEM

Nitrato no Reservatório de Anta
Vazão de Estiagem

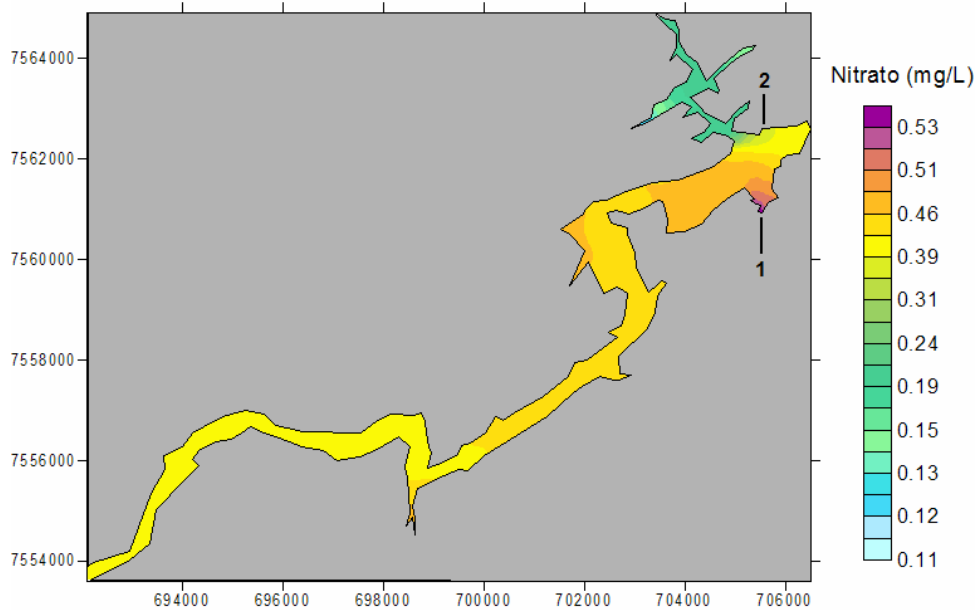
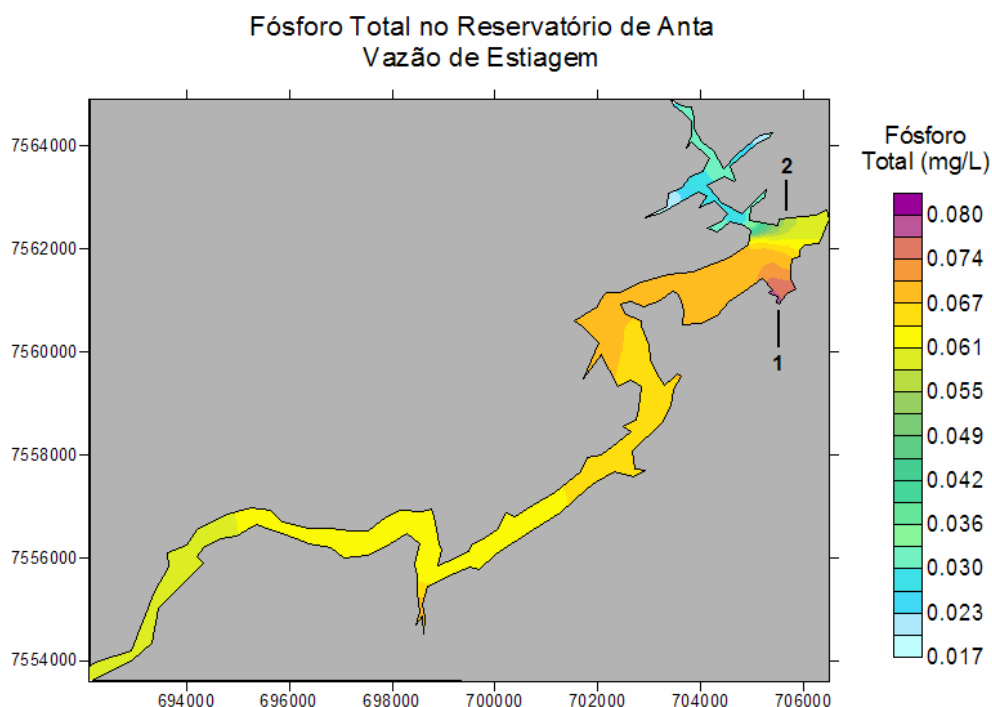


FIGURA 2.54
CONCENTRAÇÕES DE NITRATO NO RESERVATÓRIO DE ANTA APÓS A ESTABILIZAÇÃO DO CENÁRIO COM VAZÃO DE ESTIAGEM



2.4.2 - Reservatório de Tocaia

Na simulação da qualidade da água do reservatório de Tocaia foram utilizados dois cenários hidrodinâmicos para este reservatório (cheia e estiagem), mostrados na modelagem hidrodinâmica. Além disso, para cada um desses diferentes cenários, foram considerados como condição de contorno (concentrações de entrada para o reservatório de Tocaia) os valores obtidos pelo modelo de qualidade de água na saída do reservatório de Anta.

Foram utilizados ainda, como condição de contorno para o modelo, os valores de parâmetros de qualidade da água (DBO, OD, nitrato, amônia, fósforo total e temperatura) do tributário rio Tocaia (Tabela 2.9) provenientes das medições dos meses de maio e junho de 2006, apresentadas nas Tabelas 2.3 e 2.4.

TABELA 2.9
VALORES DOS PARÂMETROS DAS FONTES DE POLUIÇÃO PONTUAIS
CONSIDERADAS NO RESERVATÓRIO TOCAIA

FRONTEIRA NO MODELO	TEMPERATURA (°C)	DBO (MG/L)	OD (MG/L)	NITRATO (MG/L)	AMÔNIA (MG/L)	FÓSFORO TOTAL (MG/L)
Tributário 1	19,12	2,0	7,94	0,01	0,01	0,03

a) Cenário de Cheia

O comportamento do oxigênio dissolvido no reservatório de Tocaia está ilustrado na Figura 2.56, mostrando valores variando entre aproximadamente 7 e 8,5 mg/l. Dessa forma, pode-se afirmar que em relação ao parâmetro OD, a qualidade da água nesse reservatório é satisfatória. Além disso, percebe-se que a concentração de OD aumenta desde o início do braço do reservatório até a ligação com o canal principal.

Na região do canal principal, destacado pelo número 1, pode-se constatar uma variação muito pequena nas concentrações de OD. Esta região apresenta altas velocidades, dificultando assim as interações (ou trocas) com as outras regiões.

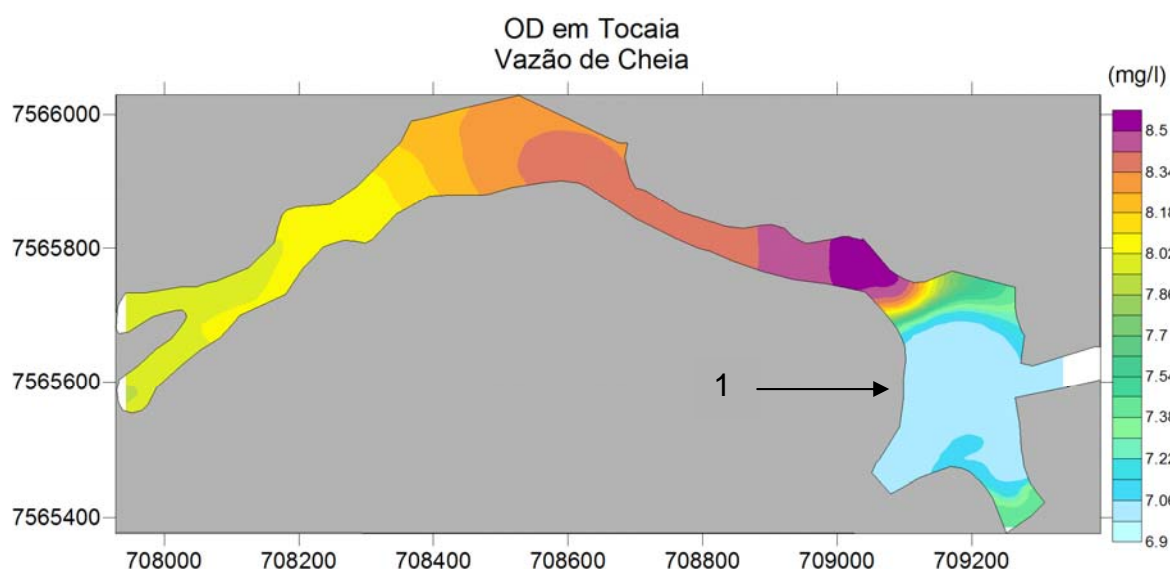


FIGURA 2.56
COMPORTAMENTO DO OD PARA O RESERVATÓRIO
TOCAIA COM VAZÃO MÁXIMA

A baixa concentração de DBO entrando no canal principal do reservatório (menos de 2 mg/l), como mostra a Figura 2.57, pode ser considerado como um fator que colaborou para a manutenção das altas concentrações de OD. A concentração mais alta de DBO (2 mg/l) provém do rio Tocaia, já considerando o cenário mais crítico. Pode-se notar a queda nas concentrações de DBO no braço do reservatório à medida que se aproxima do canal principal. Tal fato pode ser explicado pela oxidação da matéria orgânica nesse trecho.

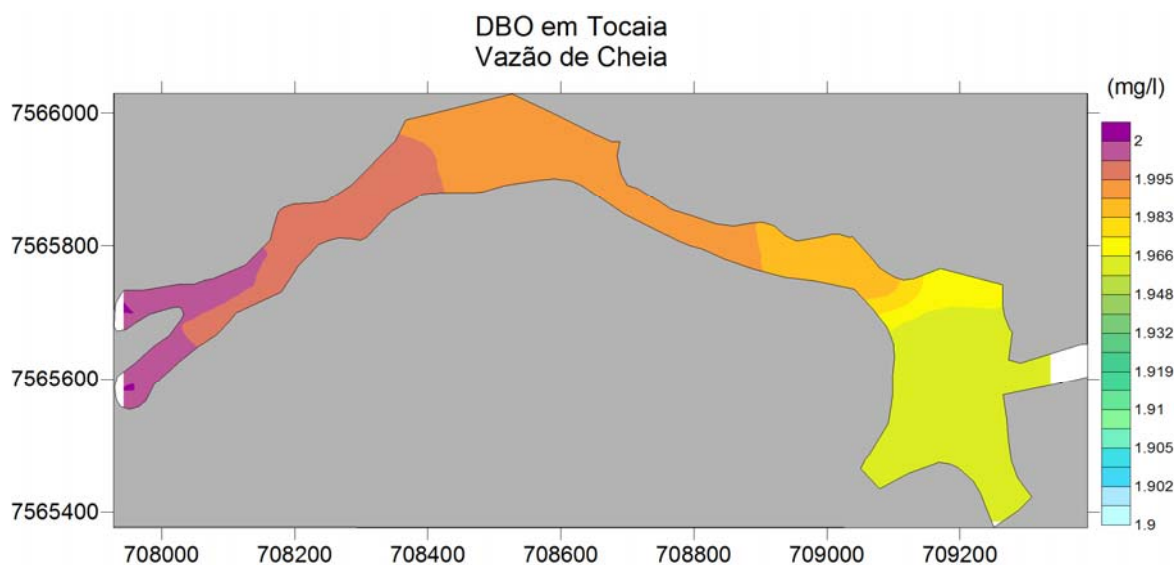


FIGURA 2.57
COMPORTAMENTO DA DBO PARA O RESERVATÓRIO
TOCAIA COM VAZÃO MÁXIMA

O comportamento da amônia no reservatório de Tocaia é mostrado na Figura 2.58, onde se percebe uma variação entre valores menores que 0,01 mg/L até valores próximos a 0,055 mg/L. O canal principal apresentou pouca variação das concentrações, considerando as altas velocidades no local. À medida que as velocidades diminuem no sentido da entrada do braço, passa a haver alguma interação entre os dois fluxos (canal principal e do braço).

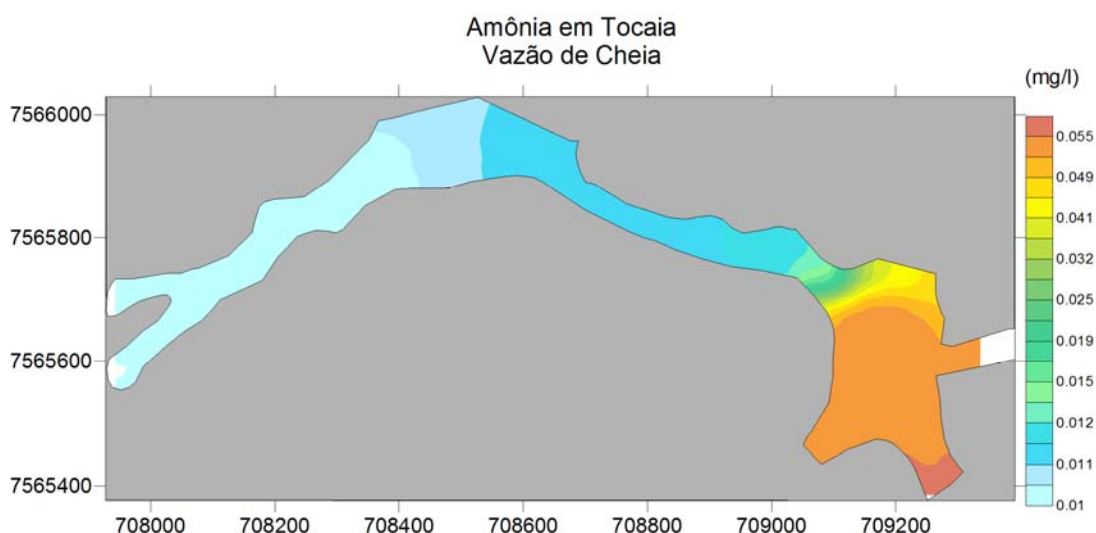


FIGURA 2.58
COMPORTAMENTO DA AMÔNIA PARA O RESERVATÓRIO
TOCAIA COM VAZÃO MÁXIMA

As concentrações de nitrato (Figura 2.59), assim como as concentrações de amônia, apresentaram valores baixos, variando entre 0,01 e 0,40 mg/L. Assim como já apresentado para as outras substâncias (OD, DBO e amônia), a massa d'água do canal principal não sofre grandes trocas, só ocorrendo nas regiões vizinhas, onde as velocidades são mais baixas.

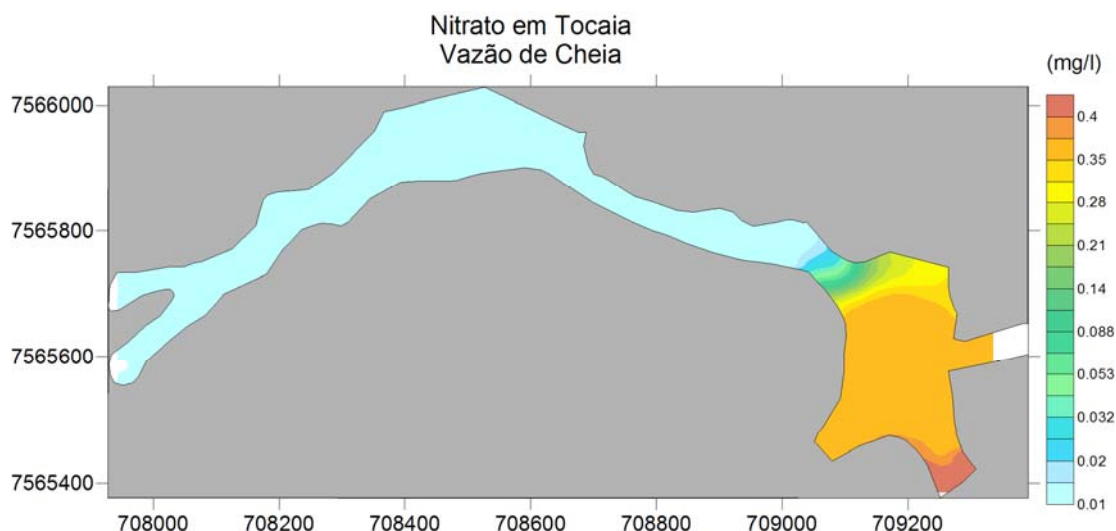


FIGURA 2.59
COMPORTAMENTO DO NITRATO PARA O RESERVATÓRIO
TOCAIA COM VAZÃO MÁXIMA

Um comportamento comum, observado para as distribuições de concentração da amônia e do nitrato, também é repetido para a distribuição espacial de concentração do fósforo total (Figura 2.60). Há um aumento nos valores de concentração para essas três substâncias, na região próxima ao ponto 1. Tal fato é causado pelas baixíssimas velocidades nesse local. Dessa forma, essas substâncias são transportadas para essas regiões e ali ficam confinadas. Como o tempo de simulação é pequeno, as trocas devido às reações cinéticas são pouco importantes.

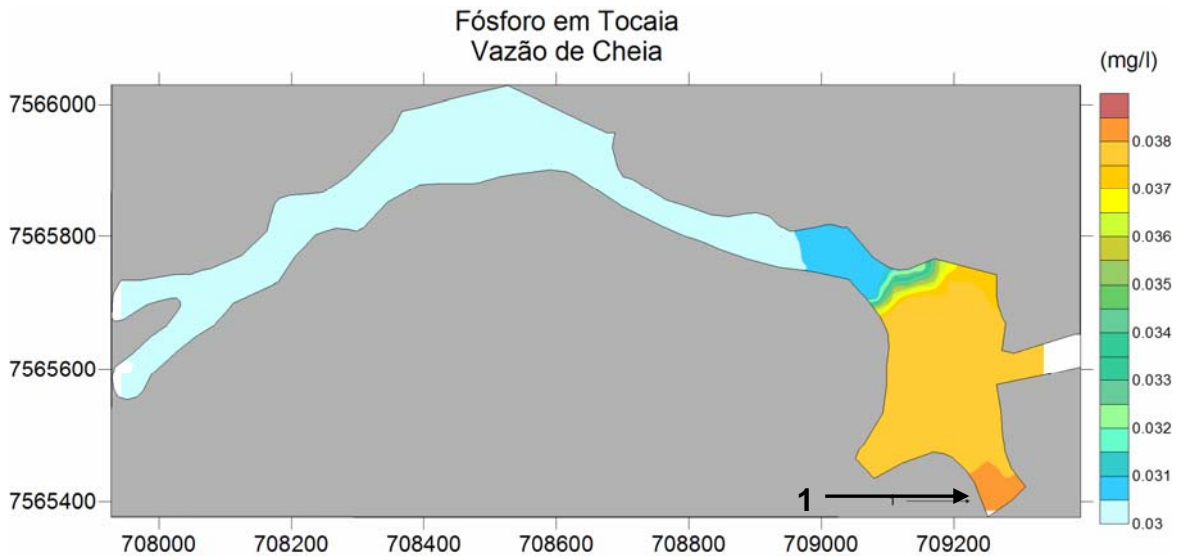


FIGURA 2.60
COMPORTAMENTO DO FÓSFORO PARA O RESERVATÓRIO
TOCAIA COM VAZÃO MÁXIMA

b) Cenário de Estiagem

A concentrações de oxigênio dissolvido para o reservatório de Tocaia no período de estiagem variaram de aproximadamente 7,9 mg/l na entrada do rio Tocaia até 8,95 mg/l no canal principal do lago (Figura 2.61). Percebe-se que de um modo geral a distribuição das concentrações de OD é próxima quando comparadas com o cenário de cheia. Porém, como já demonstrado, há uma mudança nos valores dessas concentrações.

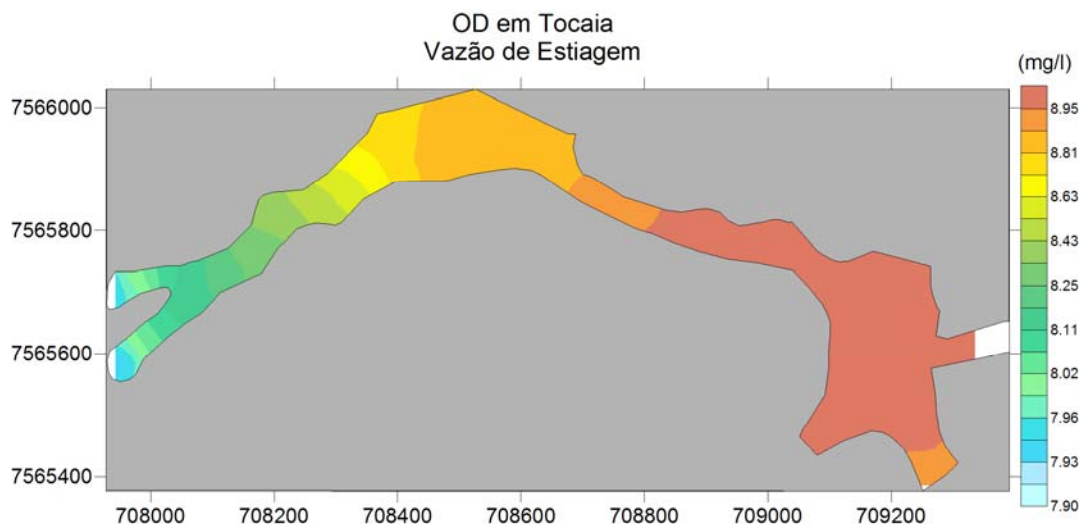


FIGURA 2.61
COMPORTAMENTO DO OD PARA O RESERVATÓRIO
TOCAIA COM VAZÃO DE ESTIAGEM

Em relação à DBO, percebe-se uma invariância de seu valor no domínio das altas velocidades do canal principal (Figura 2.62), enquanto que no braço do reservatório o comportamento é decadente, dado que a matéria orgânica vai sendo consumida pela alta concentração de oxigênio dissolvido.

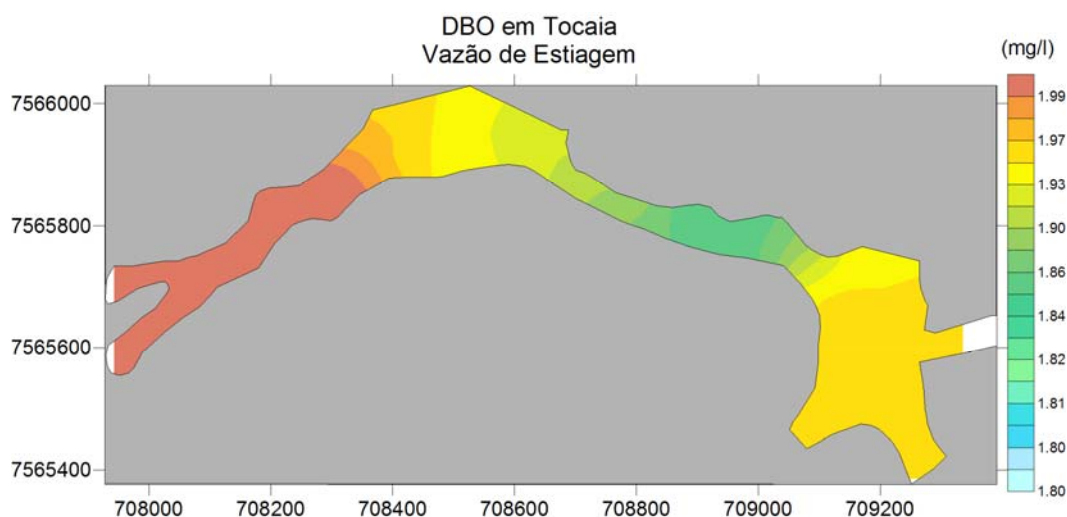


FIGURA 2.62
COMPORTAMENTO DA DBO PARA O RESERVATÓRIO
TOCAIA COM VAZÃO DE ESTIAGEM

O comportamento de fósforo, amônia e nitrato foi muito parecido com aquele do cenário de cheia. A diferença se deu apenas no local onde havia o maior gradiente entre o braço do rio Tocaia e o canal principal. Tal fato pode ser visto na Figura 2.63, que mostra a distribuição do Nitrato no reservatório de Tocaia. Apesar das pequenas diferenças espaciais, houve diferença nos máximos e mínimos de concentração.

Para o fósforo, houve variação de concentração entre aproximadamente 0,03 e 0,06 mg/l. Já para a amônia, o comportamento ficou no intervalo de 0.01 a 0.052 mg/l. Como pode ser constatado na Figura 2.63, a concentração da nitrato teve variação entre 0.01 e 0.4 mg/l.

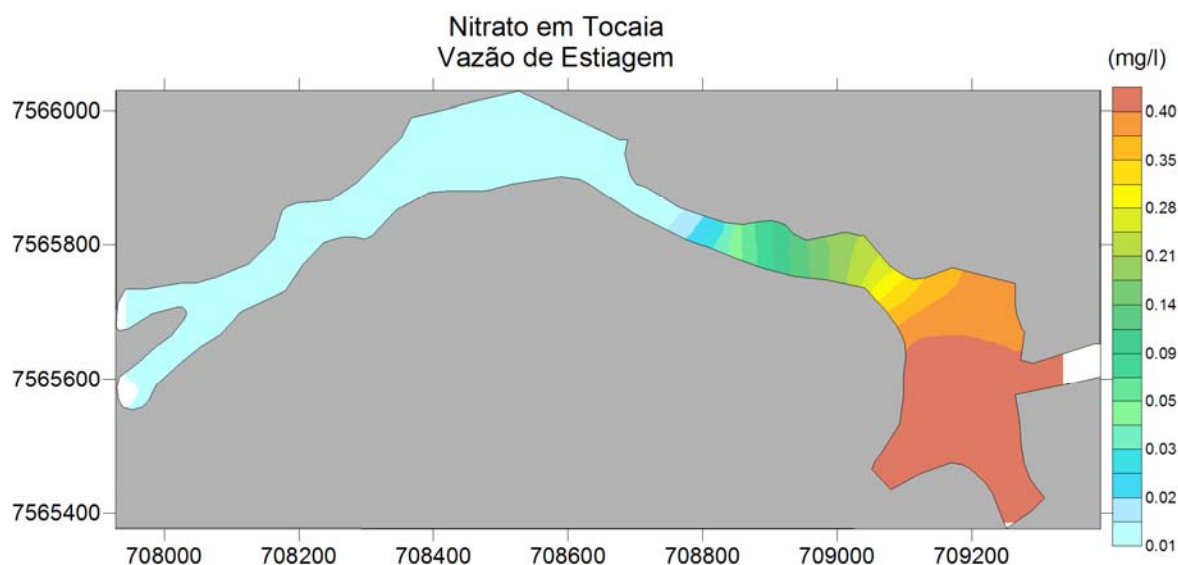


FIGURA 2.63
COMPORTAMENTO DO NITRATO PARA O RESERVATÓRIO
TOCAIA COM VAZÃO DE ESTIAGEM

2.4.3 - Reservatório de Louriçal

Seguindo a seqüência de reservatórios, o reservatório de Louriçal recebe a defluência do reservatório de Tocaia e descarrega água no reservatório de Calçado. De acordo com as simulações hidrodinâmicas, foram simulados dois cenários de qualidade de água do reservatório de Louriçal: o cenário de cheia e o de estiagem. Nestes cenários foram especificados nos dois principais tributários do reservatório de Louriçal (Figura 2.4) os valores de parâmetros de qualidade da água (DBO, OD, nitrato, amônia, fósforo total e temperatura) do sítio Rio Areia – Montante (Tabela 2.10) provenientes das medições dos meses de maio e junho de 2006 apresentadas nas Tabelas 2.3 e 2.4. Na entrada do reservatório, foram especificados os valores de parâmetros de qualidade de água obtidos nos pontos de defluência do reservatório de Tocaia.

TABELA 2.10
VALORES DOS PARÂMETROS DAS FONTES DE POLUIÇÃO PONTUAIS
CONSIDERADAS NO RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL

FRONTEIRA NO MODELO	TEMPERATURA (°C)	DBO (MG/L)	OD (MG/L)	NITRATO (MG/L)	AMÔNIA (MG/L)	FÓSFORO TOTAL (MG/L)
Tributários 1 e 2	18,58	< 2,0	7,09	0,10	< 0,01	0,02

a) Cenário de Cheia

Os resultados da simulação de qualidade da água do reservatório de Louriçal com cenário de vazões de cheia mostraram que a DBO é mantida em torno de 2 mg/L por quase toda a extensão do reservatório (Figura 2.64), em função da presença de concentrações de

OD adequadas para a oxidação da matéria orgânica e do intenso transporte advectivo-difusivo.

Já as concentrações de OD denotam três regiões distintas: o canal principal (com valores entre 7,0 e 7,2 mg/L) e os leitos de cada um dos reservatórios (com valores entre 7,0 e 8,9 mg/L). No canal principal, a distribuição das concentrações de OD mostram que, devido à forte advecção, não houve tempo de residência suficiente para que o coeficiente de reaeração aumentasse o OD na água. Com campos de velocidades mais baixos nos dois principais tributários do reservatório de Louriçal e tempos de residência maiores, o coeficiente de reaeração exerce influência significativa no incremento das concentrações de OD. Além disso, ao observar a Figura 2.65, percebe-se a dispersão das concentrações mais altas de OD provenientes do tributário 1 no canal principal.

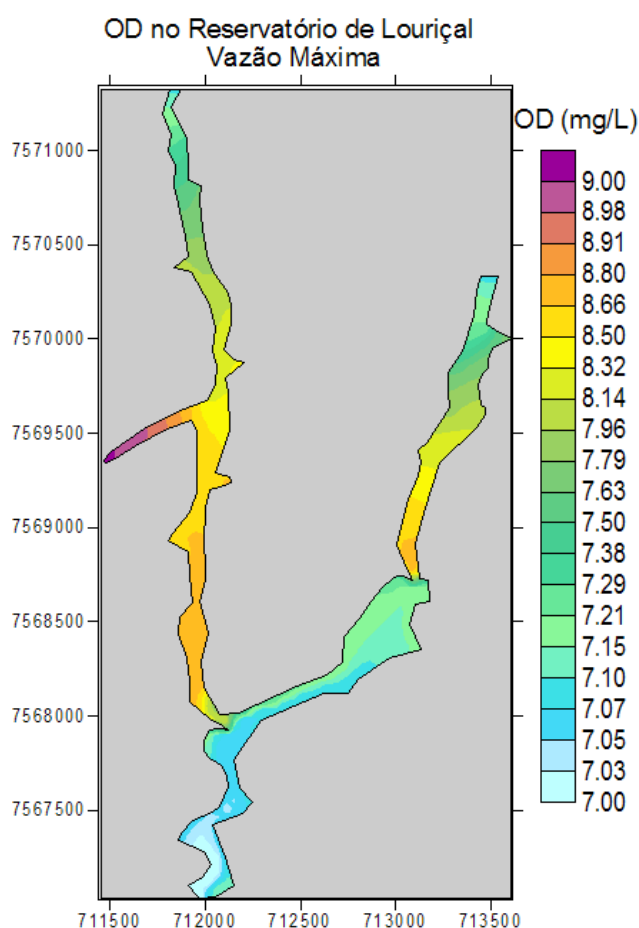
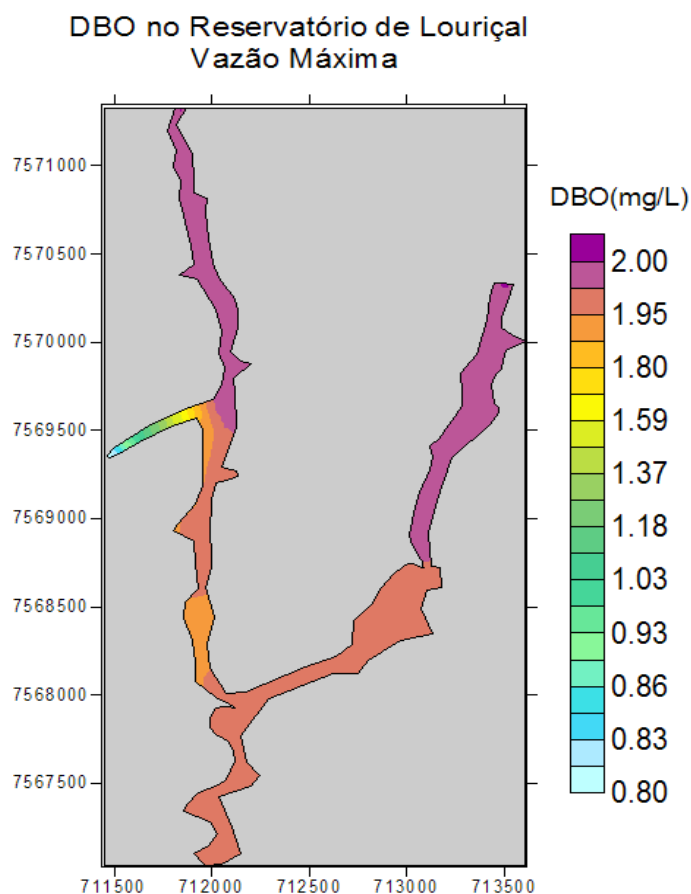


FIGURA 2.64
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES ESTABILIZADAS DE OD NO
RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL COM CENÁRIO DE VAZÃO DE CHEIA



As concentrações de amônia, nitrato e fósforo total apresentaram o mesmo padrão de distribuição espacial, sendo mais altas no canal principal e mais baixas nos tributários, conforme ilustrado nas Figuras 2.66 a 2.68. No canal principal, o transporte advectivo-difusivo exerce uma maior influência nas concentrações destes compostos do que as reações de oxi-redução, o que aproximou as simulações de amônia, nitrato e fósforo a simulações de transporte de constituintes passivos. Já nos tributários, aonde os tempos de residências são maiores, é possível perceber um ligeiro aumento das concentrações de amônia e nitrato devido à fixação do nitrogênio atmosférico e à oxidação da amônia.

Vale ressaltar a eficácia da estruturas hidráulica proposta na foz do tributário 1, diante da percepção das plumas de OD, nitrato, amônia e fósforo total liberadas no canal principal.

Amônia Reservatório de Louriçal
Vazão Máxima

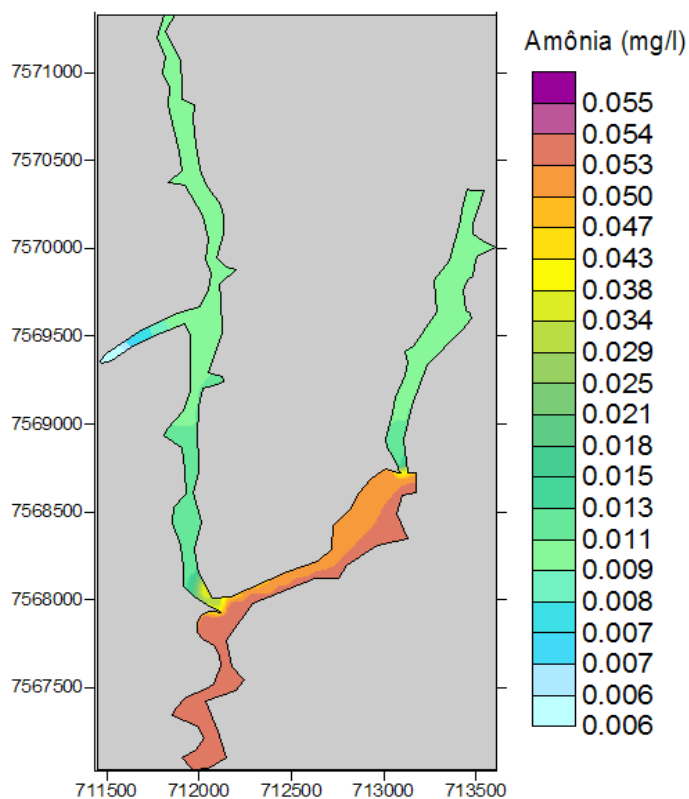


FIGURA 2.66
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES ESTABILIZADAS DE AMÔNIA
NO RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL COM CENÁRIO DE VAZÃO DE CHEIA

Nitrato no Reservatório de Louriçal
Vazão Máxima

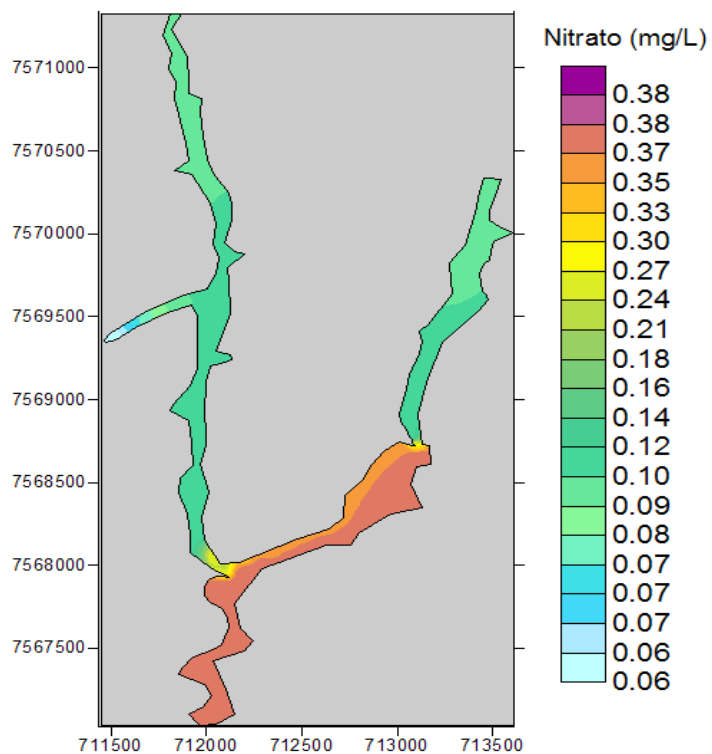


FIGURA 2.67
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES ESTABILIZADAS DE NITRATO
NO RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL COM CENÁRIO DE VAZÃO DE CHEIA

Fósforo Total no Reservatório de Louriçal
Vazão Máxima

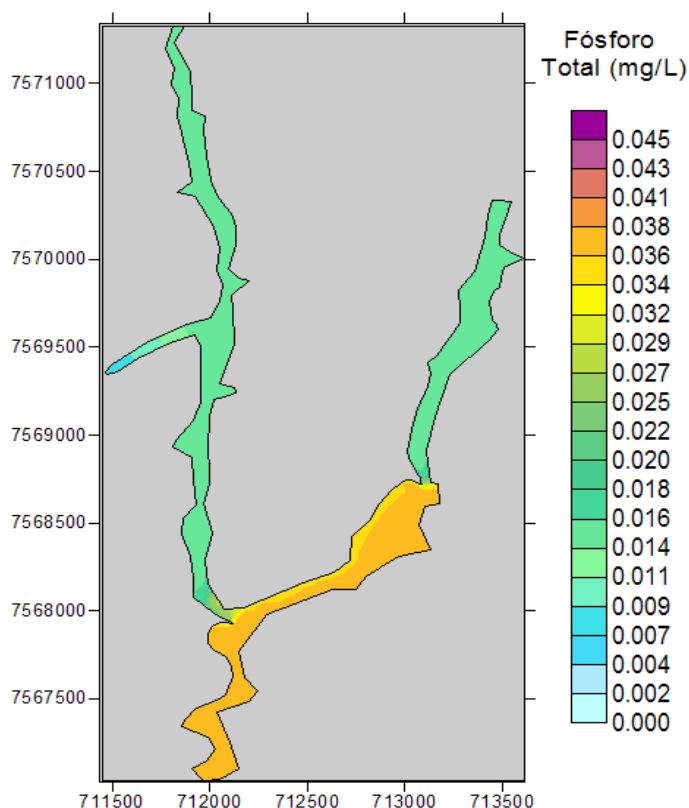


FIGURA 2.68
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES ESTABILIZADAS DE FÓSFORO TOTAL NO RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL COM CENÁRIO DE VAZÃO DE CHEIA

b) Cenário de Estiagem

Os resultados da simulação de qualidade da água do reservatório de Louriçal com cenário de vazões de estiagem mostraram distribuições espaciais de OD e DBO mais homogêneas do que as observadas no cenário de cheia, com valores de OD entre 8,8 e 9,3 mg/L e de DBO entre 1,8 e 2,0 mg/L na maior parte do reservatório. A homogeneidade destas distribuições, ilustradas nas Figuras 2.69 e 2.70, denota um maior equilíbrio entre as influências do transporte advectivo-difusivo e as reações de oxi-redução causado pelo tempo de detenção mais elevado no cenário de estiagem.

OD no Reservatório de Louriçal
Vazão Mínima

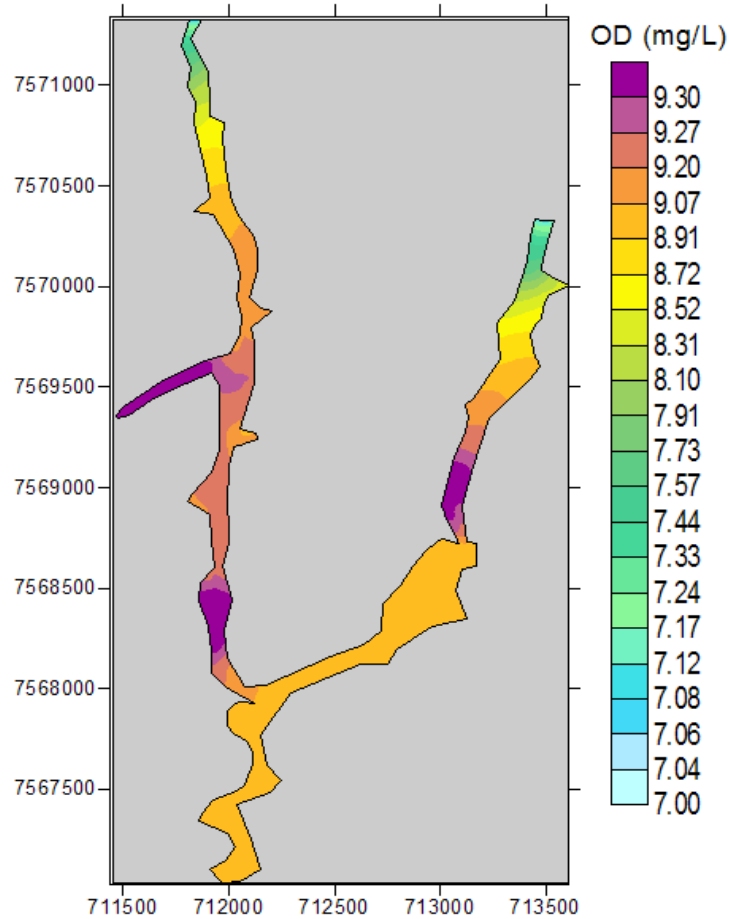


FIGURA 2.69
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES ESTABILIZADAS DE OD NO
RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL COM CENÁRIO DE VAZÃO DE ESTIAGEM

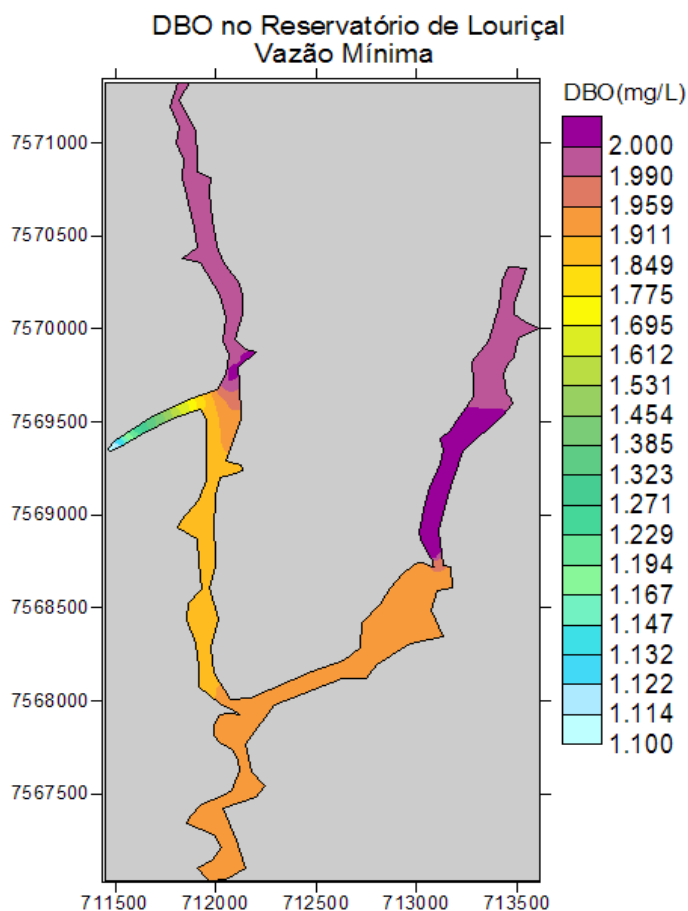


FIGURA 2.70
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES ESTABILIZADAS DE DBO NO
RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL COM CENÁRIO DE VAZÃO DE ESTIAGEM

As concentrações de amônia, nitrato e fósforo total apresentaram o mesmo padrão de distribuição espacial, sendo mais altas no canal principal e mais baixas nos tributários, conforme ilustrado nas Figuras 2.71 a 2.73. No canal principal, o transporte advectivo-difusivo exerce uma maior influência nas concentrações destes compostos do que as reações de oxi-redução, entretanto no cenário de vazão de estiagem já é possível perceber uma leve degradação da amônia. Já nos tributários, aonde os tempos de residências são maiores, é possível perceber um maior aumento das concentrações de amônia e nitrato devido à fixação do nitrogênio atmosférico e à oxidação da amônia.

Amônia no Reservatório de Louriçal
Vazão Mínima

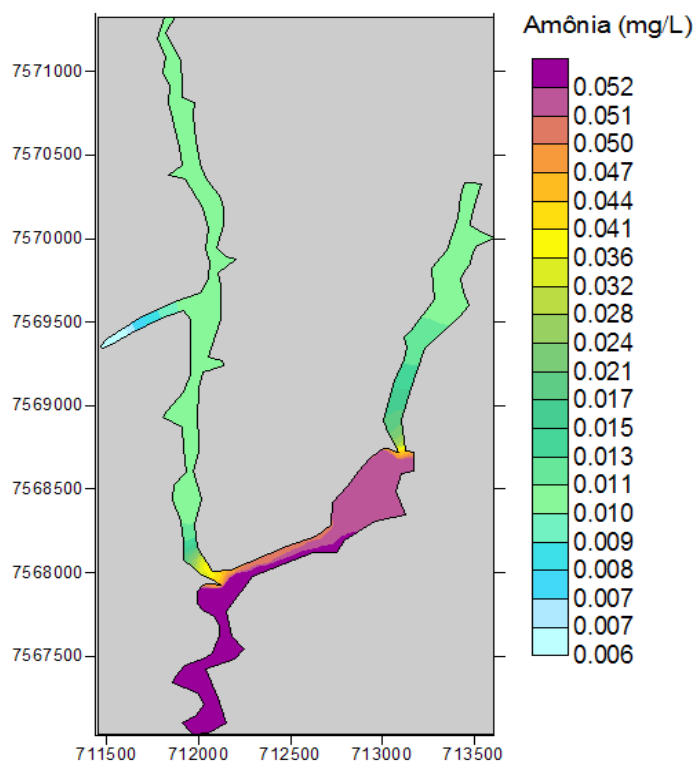


FIGURA 2.71
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES ESTABILIZADAS DE AMÔNIA
NO RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL COM CENÁRIO DE VAZÃO DE ESTIAGEM

Nitrato no Reservatório de Louriçal
Vazão Mínima

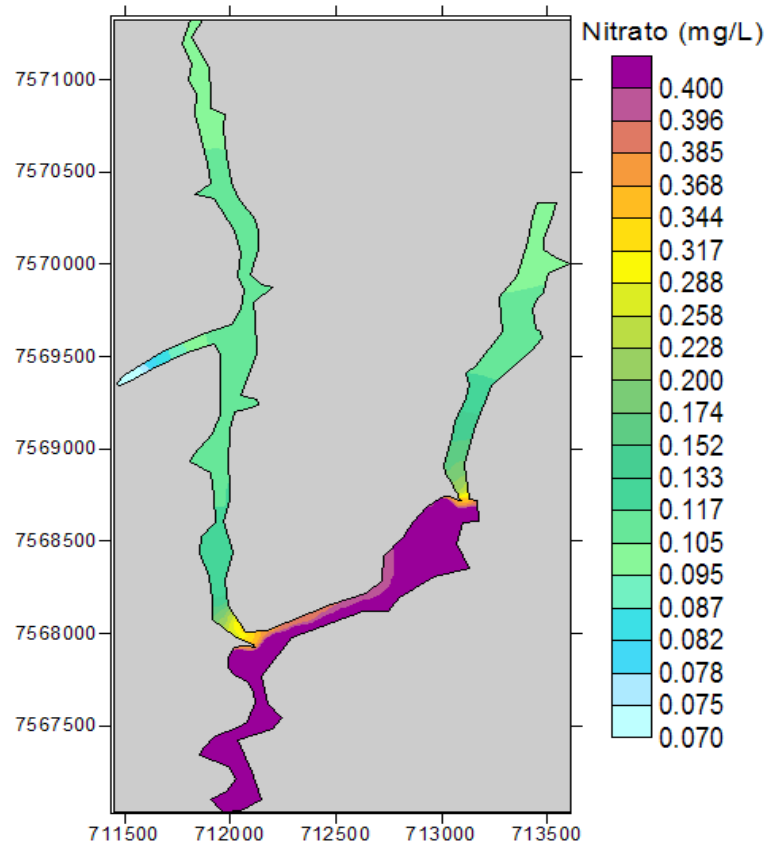


FIGURA 2.72
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES ESTABILIZADAS DE NITRATO
NO RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL COM CENÁRIO DE VAZÃO DE ESTIAGEM

Fósforo Total no Reservatório de Louriçal
Vazão Mínima

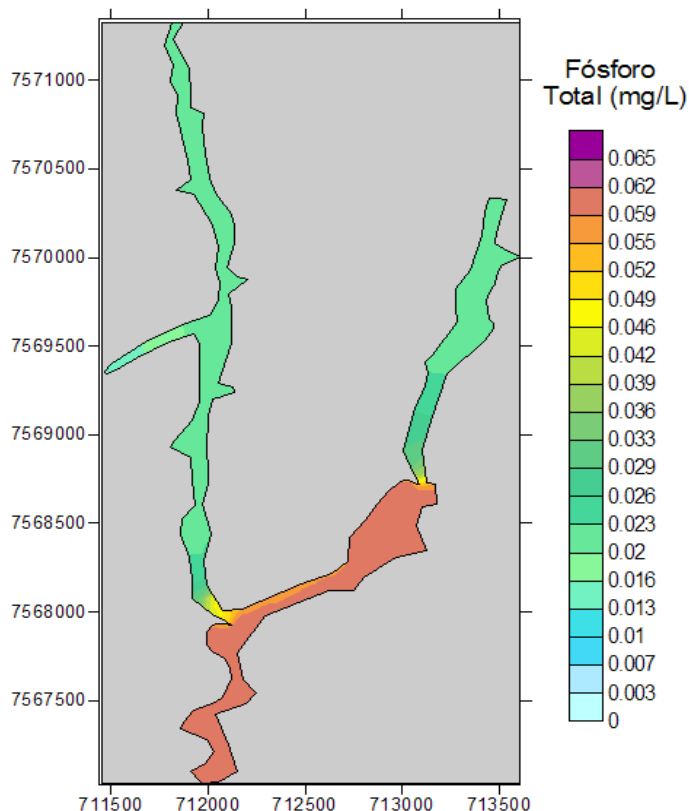


FIGURA 2.73
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES ESTABILIZADAS DE FÓSFORO TOTAL NO RESERVATÓRIO DE LOURIÇAL COM CENÁRIO DE VAZÃO DE ESTIAGEM

2.4.4 - Reservatório de Calçado

Para a simulação da qualidade da água do reservatório Calçado, o quarto do AHE Simplício, foram utilizados dois cenários de campos de velocidade no reservatório (cheia e estiagem) gerados na modelagem hidrodinâmica. Além disso, para cada um desses cenários, diferentes concentrações de entrada para o reservatório de Calçado foram obtidas na saída do reservatório de Louriçal pela modelagem da qualidade da água.

Foram utilizados os valores de parâmetros de qualidade da água (DBO, OD, nitrato, amônia, fósforo total e temperatura) do tributário rio da Prata (Tabela 2.11) provenientes das medições dos meses de maio e junho de 2006 apresentadas nas Tabelas 2.3 e 2.4.

TABELA 2.11
VALORES DOS PARÂMETROS DAS FONTES DE POLUIÇÃO PONTUAIS
CONSIDERADAS NO RESERVATÓRIO CALÇADO

FRONTEIRA NO MODELO	TEMPERATURA (°C)	DBO (MG/L)	OD (MG/L)	NITRATO (MG/L)	AMÔNIA (MG/L)	FÓSFORO TOTAL (MG/L)
Tributário 1	19,24	2,0	7,94	0,08	0,01	0,02

a) Cenário de Cheia

O comportamento do OD dentro do reservatório de Calçado apresentou variação entre aproximadamente 7,1 a 8,15 mg/l. As maiores concentrações apareceram na entrada do tributário, ponto 1 da Figura 2.74, e em duas regiões de baixa circulação (pontos 2 e 3). O primeiro ponto pode ser explicado pela entrada de boa concentração de OD pelo tributário combinado com uma baixa concentração de DBO. Já no caso das regiões 2 e 3, pode explicar que o OD permaneceu com uma concentração alta devido à baixa taxa de troca nesse local, causada pelas baixas velocidades.

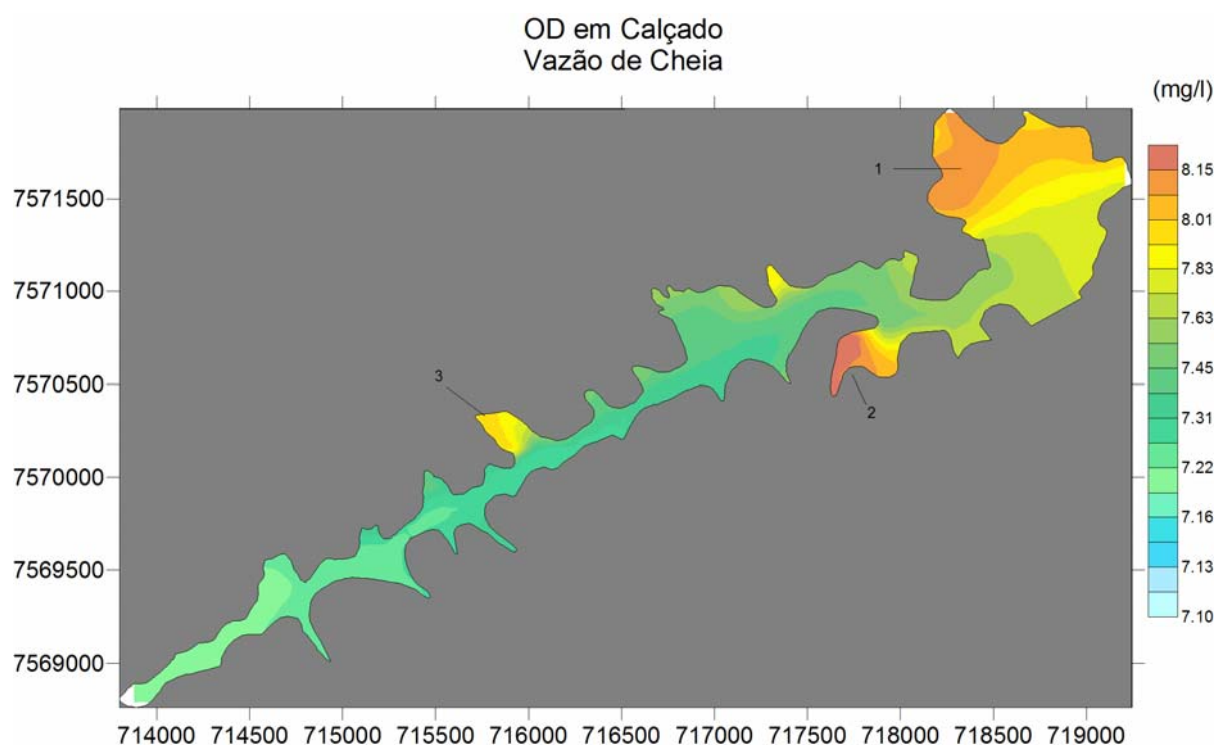


FIGURA 2.74
COMPORTAMENTO DO OD PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE CHEIA

Nas duas regiões de baixa circulação com concentrações de OD mais altas, percebemos também (Figura 2.75) que há uma leve diminuição nas concentrações de DBO. Ou seja, devido à alta concentração de OD a matéria orgânica passa a ser consumida, causando uma diminuição local da DBO.

No reservatório como um todo, as concentrações da demanda bioquímica de oxigênio variaram entre aproximadamente 1,9 e 2,1 mg/l. Ou seja, as variações, em geral, são de pequena magnitude.

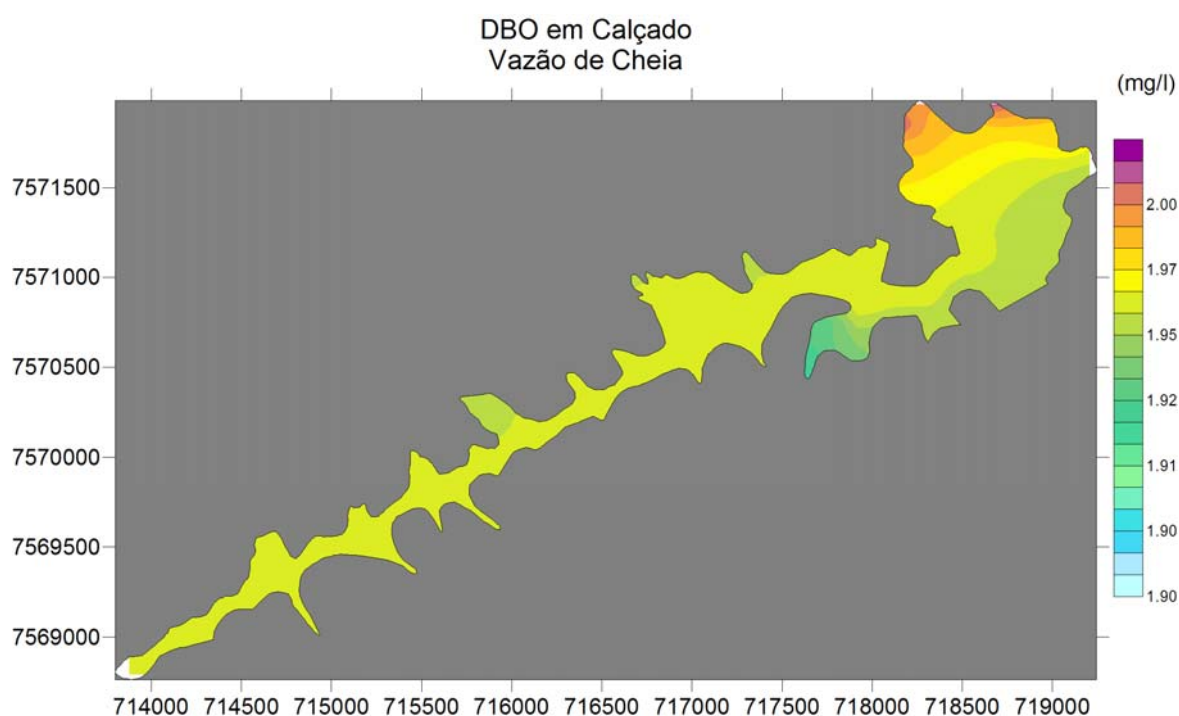


FIGURA 2.75
COMPORTAMENTO DA DBO PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE CHEIA

Na entrada do tributário para o reservatório de Calçado, percebe-se um aumento da concentração da amônia. Tal fato foi causado pela mistura das duas águas – do tributário e do reservatório. Como o reservatório possuía uma concentração mais alta e um volume grande de água, a água que entrou pelo tributário entrou em equilíbrio com a massa d'água.

Mais uma vez, as duas regiões de baixa circulação (já apontadas para OD e DBO) mostraram um aumento das concentrações de amônia (Figura 2.76). Isso foi causado pela entrada dessa substância nesse local, trazida por transporte advectivo e difusivo e pela baixa capacidade de troca existente nesse local. No geral, as concentrações de amônia variaram de aproximadamente 0,01 a 0,08 mg/l, enquanto o nitrato variou entre 0,08 e 0,57 mg/l, como mostra a Figura 2.77.

Amônia em Calçado
Vazão de Cheia

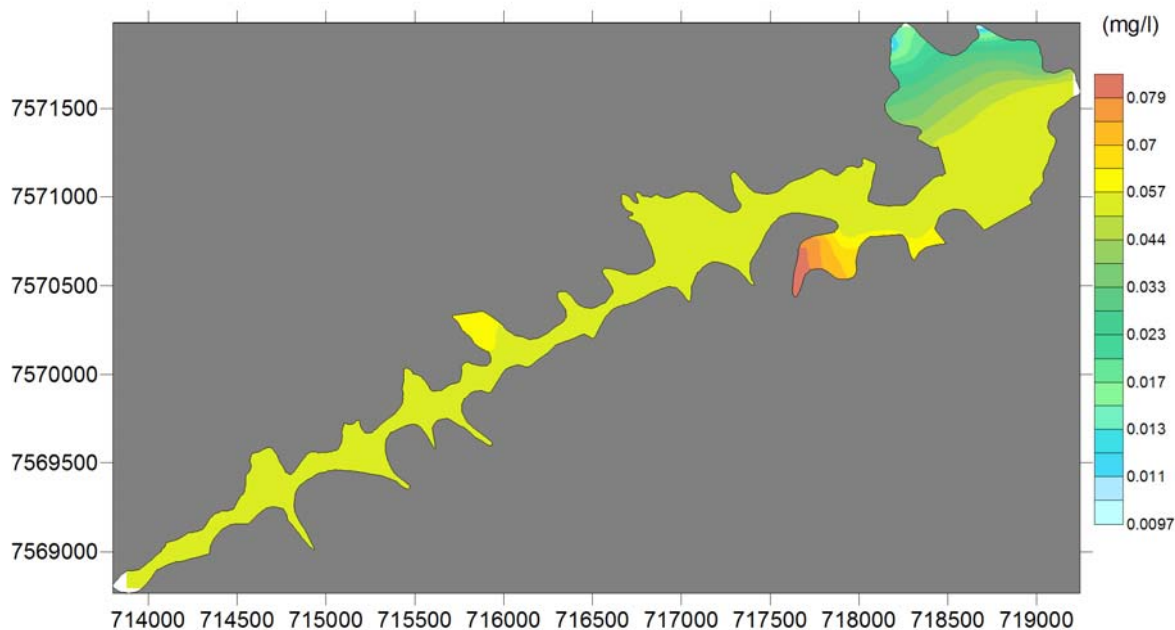


FIGURA 2.76
COMPORTAMENTO DA AMÔNIA PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE CHEIA

Nitrato em Calçado
Vazão de Cheia

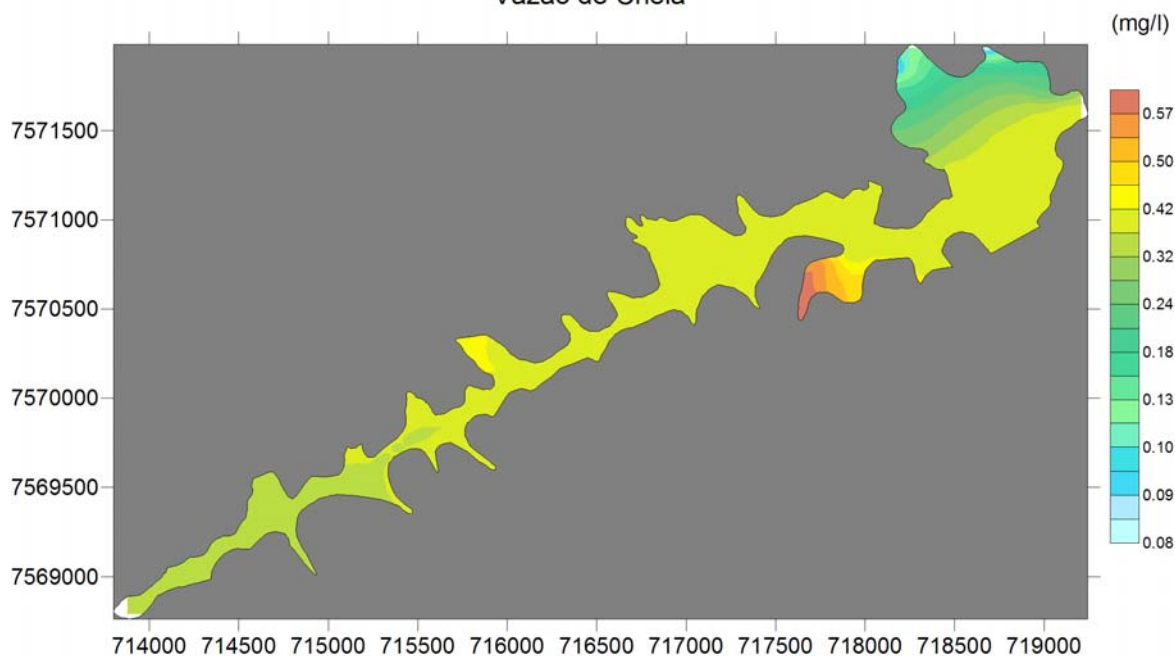


FIGURA 2.77
COMPORTAMENTO DO NITRATO PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE CHEIA

Um comportamento que pode ser observado para amônia e nitrato pode ser visto também para o fósforo na Figura 2.78. A distribuição dessas três substâncias é praticamente igual, aumentando e diminuindo nos mesmos pontos. Tal fato é causado pela dominância das velocidades dentro desse reservatório, superando a importância das taxas de reação química.

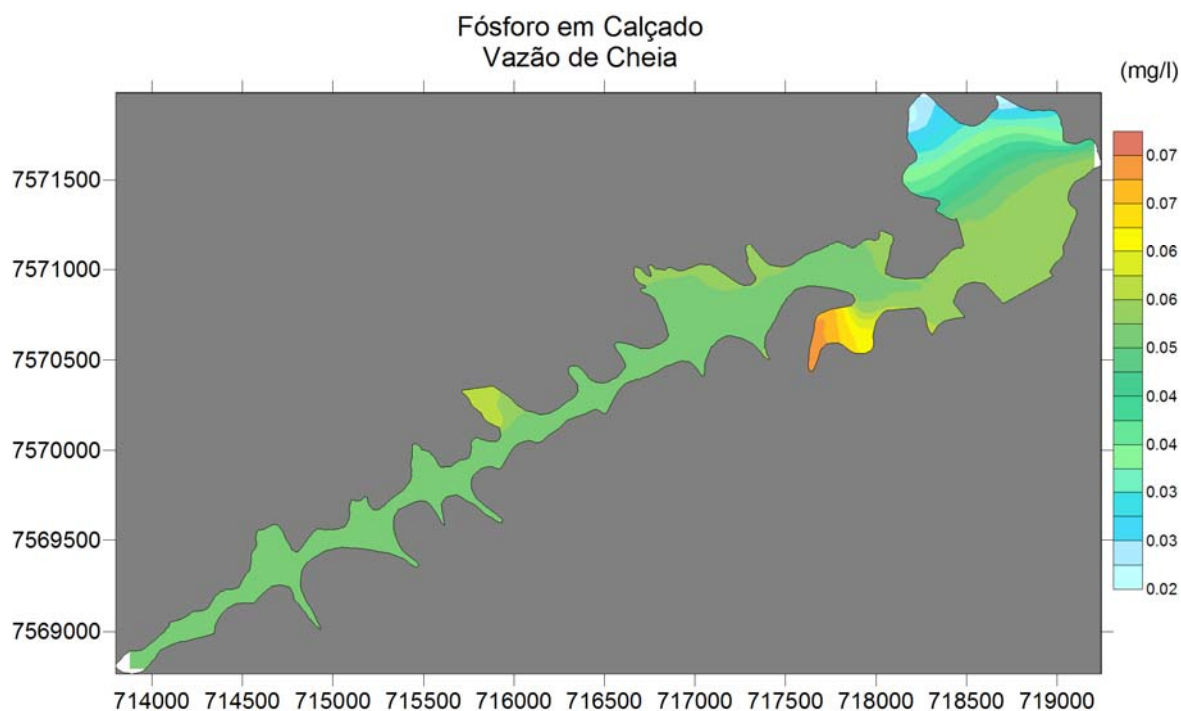


FIGURA 2.78
COMPORTAMENTO DO FÓSFORO PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE CHEIA

b) Cenário de Estiagem

A concentrações de oxigênio dissolvido para o reservatório de Calçado no período de estiagem variaram de aproximadamente 7,9 mg/l na entrada do rio Tocaia até 8,82 mg/l no canal principal do lago (Figura 2.79). Percebe-se que de um modo geral a distribuição das concentrações de OD é próxima quando comparamos com o cenário de cheia. Porém, como já demonstrado, há uma mudança nos valores dessas concentrações.

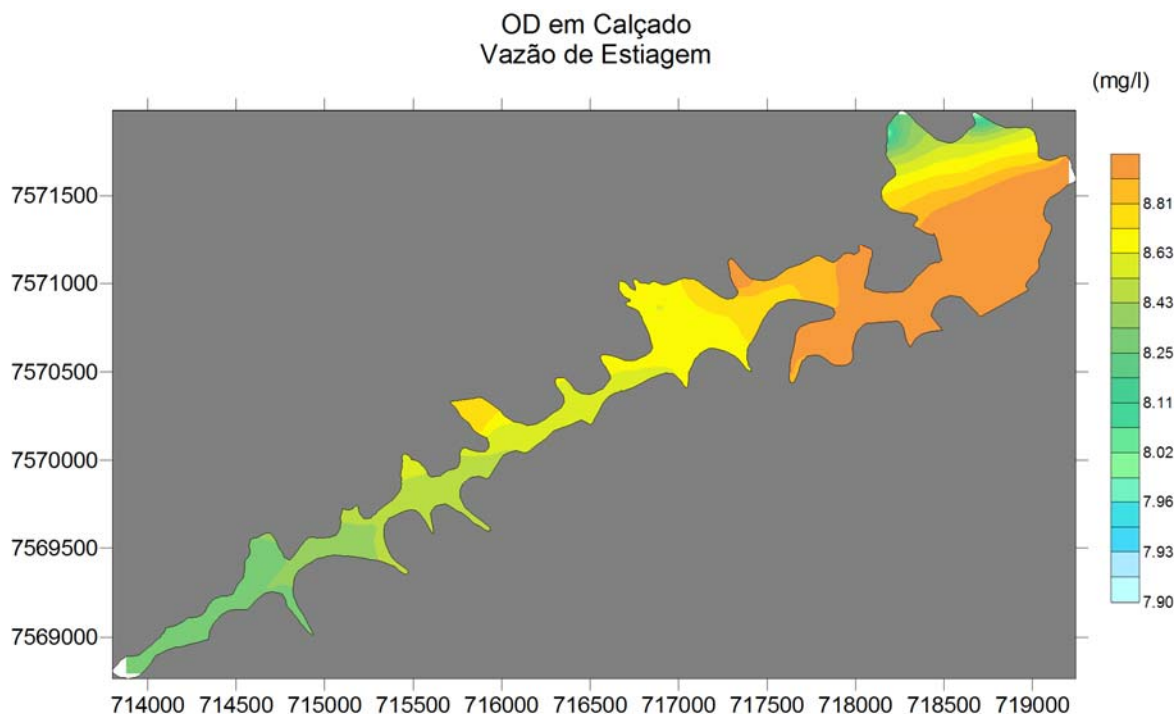


FIGURA 2.79
COMPORTAMENTO DO OD PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE ESTIAGEM

Em relação à DBO, percebe-se uma invariância de seu valor no domínio das altas velocidades do canal principal (Figura 2.80), enquanto que no braço do reservatório o comportamento é decadente, dado que a matéria orgânica vai sendo consumida pela alta concentração de oxigênio dissolvido.

As variações de concentrações se dão entre os patamares de 1,8 a 2 mg/l, sendo que esse valor máximo é aquele entrando pelo tributário.

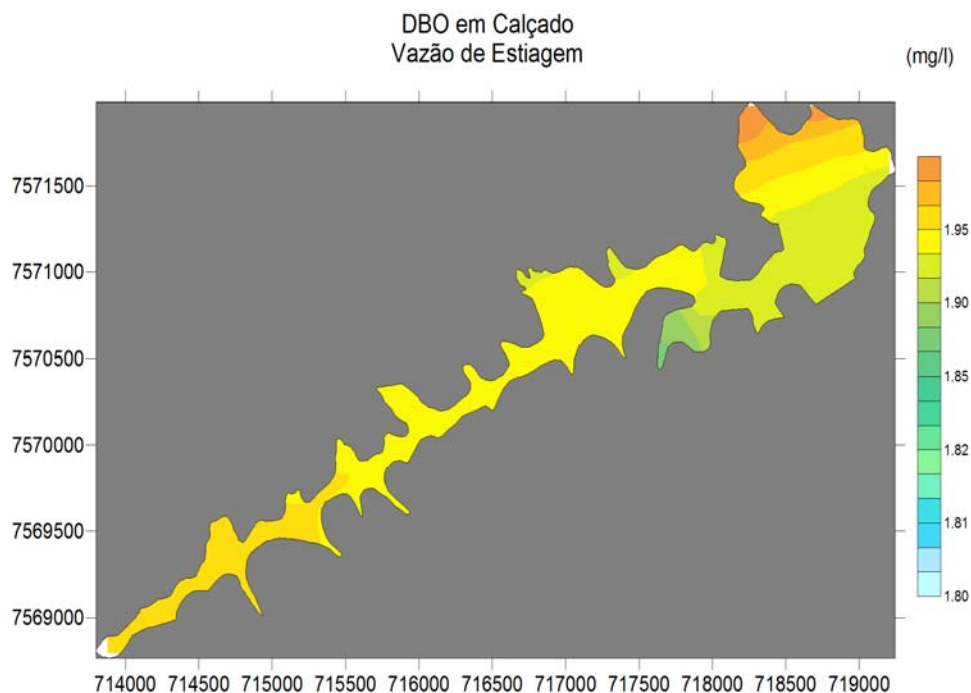


FIGURA 2.80
COMPORTAMENTO DA DBO PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE ESTIAGEM

Para o cenário de estiagem, a distribuição espacial da concentração de amônia pode ser vista na Figura 2.81. A concentração variou entre 0.01 e 0.07 mg/l, sendo que esse valor mínimo é proveniente da entrada do tributário do reservatório.

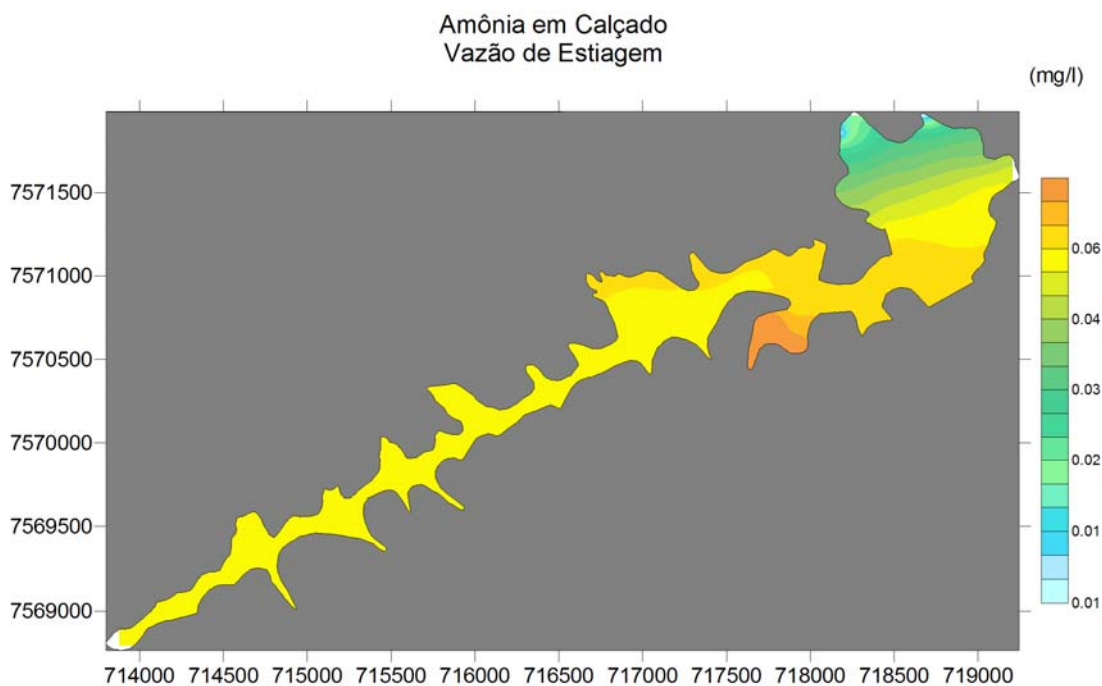


FIGURA 2.81
COMPORTAMENTO DA AMÔNIA PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE ESTIAGEM

A distribuição espacial das concentrações de amônia, nitrato e fósforo para os cenários de estiagem e cheia é muito parecida, como pode ser percebido nas Figura 2.81, 2.82 e 2.83, respectivamente.

A mais alta concentração de nitrato está próximo de 0,6 mg/l, nas regiões de baixa circulação, enquanto que o valor mais baixo é de aproximadamente 0,08 mg/l, próximo da entrada do tributário, como pode ser observado na Figura 2.82.

Para o fósforo, cujo comportamento é muito semelhante ao do nitrato, como pode ser visto na Figura 2.83, as concentrações variaram de aproximadamente 0,02 a 0,08 mg/l.

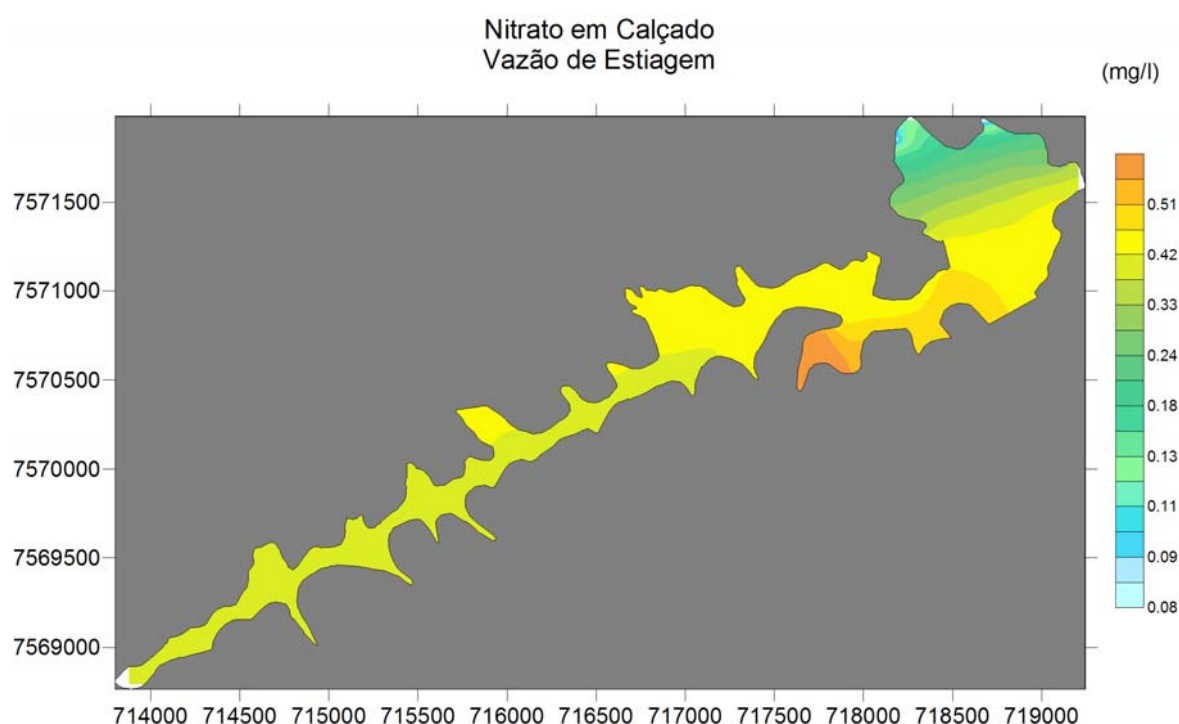


FIGURA 2.82
COMPORTAMENTO DO NITRATO PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE ESTIAGEM

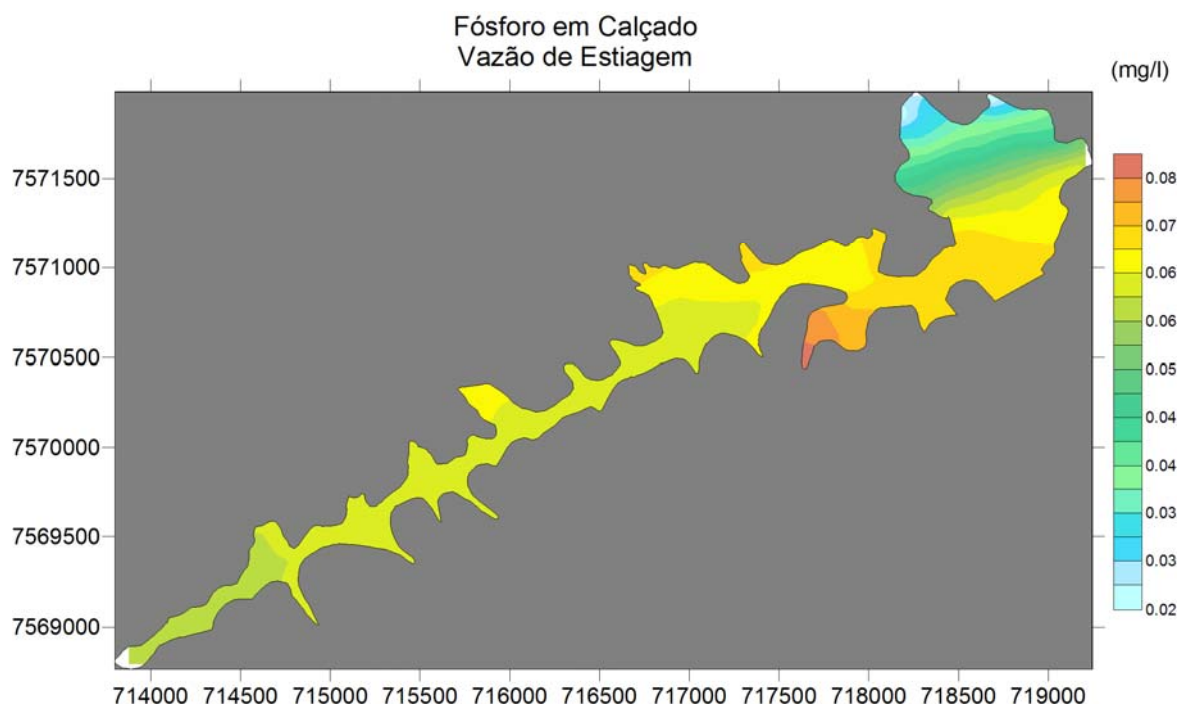


FIGURA 2.83
COMPORTAMENTO DO FÓSFORO PARA O RESERVATÓRIO
CALÇADO COM VAZÃO DE ESTIAGEM

2.4.5 - Reservatórios de Antonina e Peixe

Os reservatórios de Antonina e Peixe recebem a defluência do reservatório de Calçado e são os últimos da cascata de reservatórios do AHE Simplício. Desta forma, os resultados deste reservatório representam o final da influência do AHE Simplício sobre a qualidade da água proveniente do rio Paraíba do Sul.

De acordo com as simulações hidrodinâmicas, foram simulados dois cenários de qualidade de água dos reservatórios de Antonina e Peixe: o cenário de cheia e o de estiagem. Nestes cenários foram especificados no principal tributário do reservatório de Peixe (Figura 2.6) os valores de parâmetros de qualidade da água (DBO, OD, nitrato, amônia, fósforo total e temperatura) do sítio Rio do Peixe – Montante (Tabela 2.12) provenientes das medições dos meses de maio e junho de 2006 apresentadas nas Tabelas 2.3 e 2.4. Na entrada do reservatório, foram especificados os valores de parâmetros de qualidade de água obtidos nos pontos de defluência do reservatório de Calçado.

TABELA 2.12
VALORES DOS PARÂMETROS DAS FONTES DE POLUIÇÃO PONTUAIS
CONSIDERADAS NOS RESERVATÓRIOS DE ANTONINA E PEIXE

FRONTEIRA NO MODELO	TEMPERATURA (°C)	DBO (MG/L)	OD (MG/L)	NITRATO (MG/L)	AMÔNIA (MG/L)	FÓSFORO TOTAL (MG/L)
Tributário 1	20,00	< 2,0	7,19	0,10	< 0,01	0,03

a) Cenário de Cheia

Os resultados da simulação de qualidade da água dos reservatórios de Antonina e Peixe com cenário de estiagem mostraram distribuição espacial de DBO quase constante ao longo dos reservatórios, conforme se pode constatar na Figura 2.85. Já a concentração de OD apresentou aumento de montante para jusante (Figura 2.84), devido a reaeração provocada pela velocidade do fluxo.

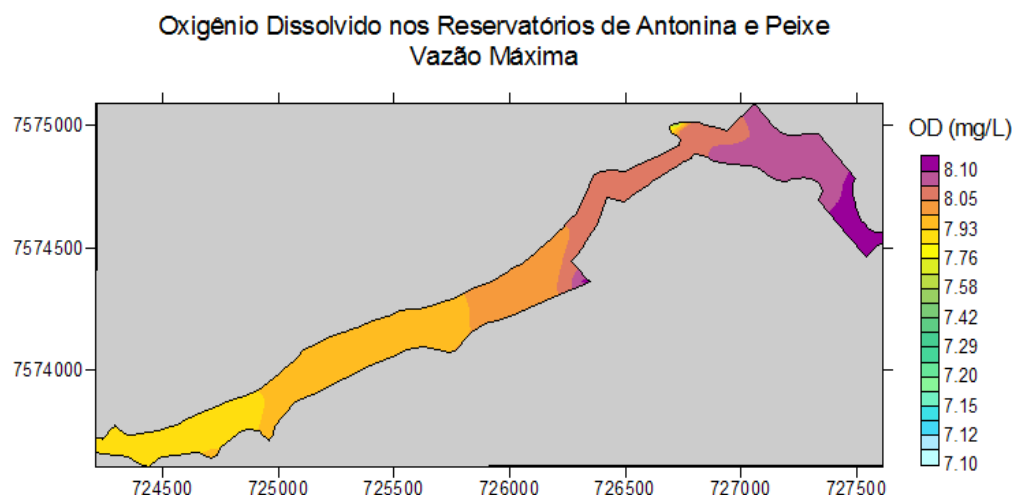


FIGURA 2.84
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE OD NOS RESERVATÓRIOS
DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO
COM CENÁRIO DE VAZÕES DE CHEIA

DBO nos Reservatórios de Antonina e Peixe
Vazão Máxima

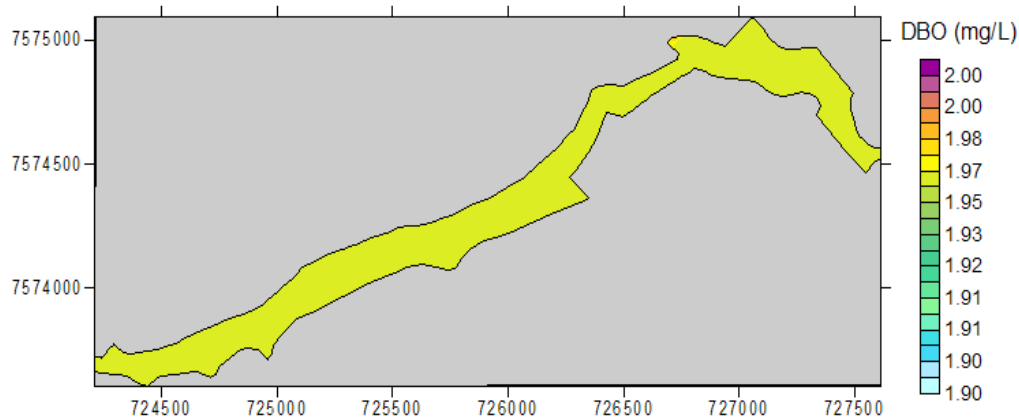


FIGURA 2.85
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE DBO NOS RESERVATÓRIOS
DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO COM
CENÁRIO DE VAZÕES DE CHEIA

As concentrações de amônia, nitrato e fósforo total apresentaram o mesmo padrão de distribuição espacial, conforme ilustrado nas Figuras 2.86 a 2.88. No canal principal, o transporte advectivo-difusivo exerce uma maior influência nas concentrações destes compostos do que as reações de oxi-redução, o que aproximou as simulações de amônia, nitrato e fósforo a simulações de transporte de constituintes passivos.

Amônia nos Reservatórios de Antonina e Peixe
Vazão Máxima

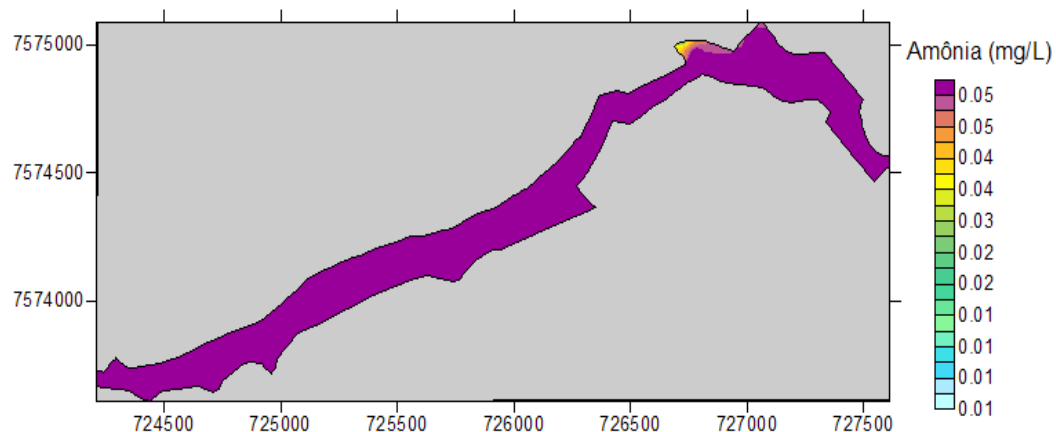


FIGURA 2.86
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE AMÔNIA NOS RESERVATÓRIOS
DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO COM
CENÁRIO DE VAZÕES DE CHEIA

Nitrato nos Reservatórios de Antonina e Peixe
Vazão Máxima

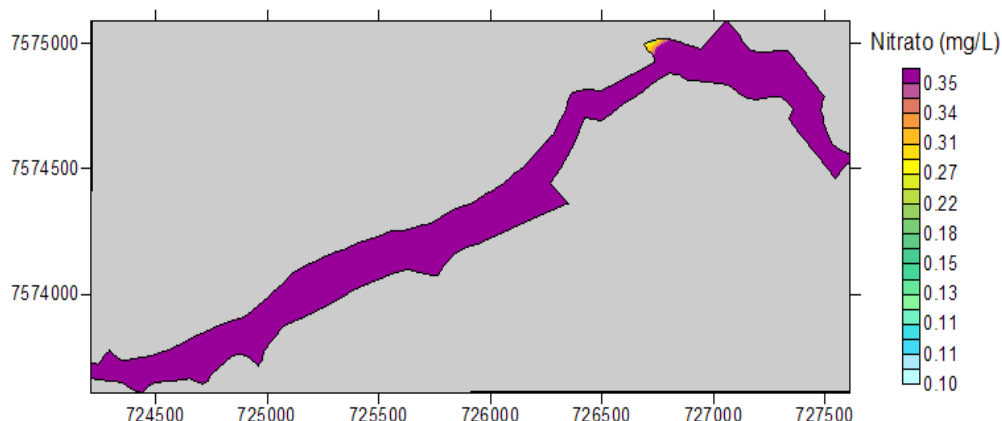


FIGURA 2.87
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE NITRATO NOS RESERVATÓRIOS DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO COM CENÁRIO DE VAZÕES DE CHEIA

Fósforo Total nos Reservatórios de Antonina e Peixe
Vazão de Cheia

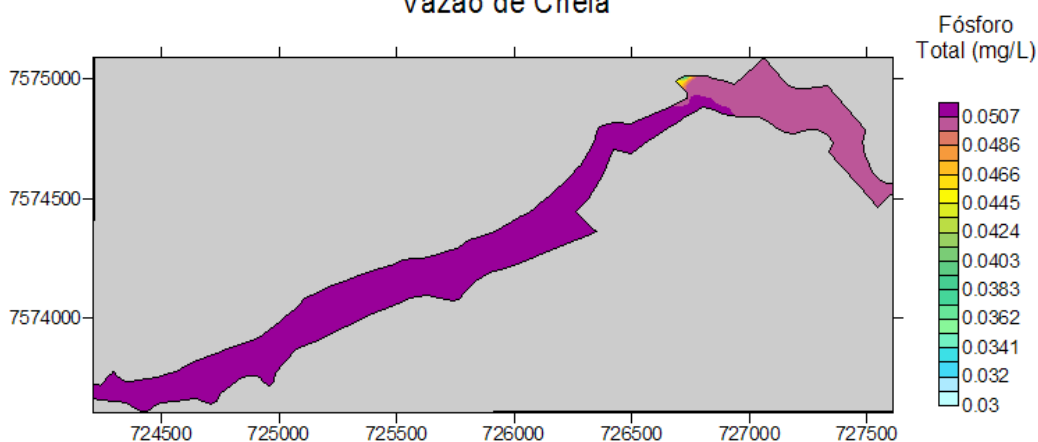


FIGURA 2.88
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO TOTAL NOS RESERVATÓRIOS DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO COM CENÁRIO DE VAZÕES DE CHEIA

b) Cenário de Estiagem

Os resultados da simulação de qualidade da água dos reservatórios de Antonina e Peixe com cenário de estiagem mostraram que os comportamentos espaciais das concentrações de DBO e OD são bastante próximos, conforme ilustrado nas Figuras 2.89 e 2.90. As concentrações de DBO se estabilizaram entre 1,93 e 1,95 mg/L em quase todas as regiões dos reservatórios, exceto na região de dispersão da pluma de DBO

afluente via o tributário 1. As concentrações de OD se estabilizaram entre 8,8 e 9,0 mg/L em quase toda a extensão dos reservatórios, sendo perceptível a dispersão das concentrações mais baixas provenientes do tributário 1.

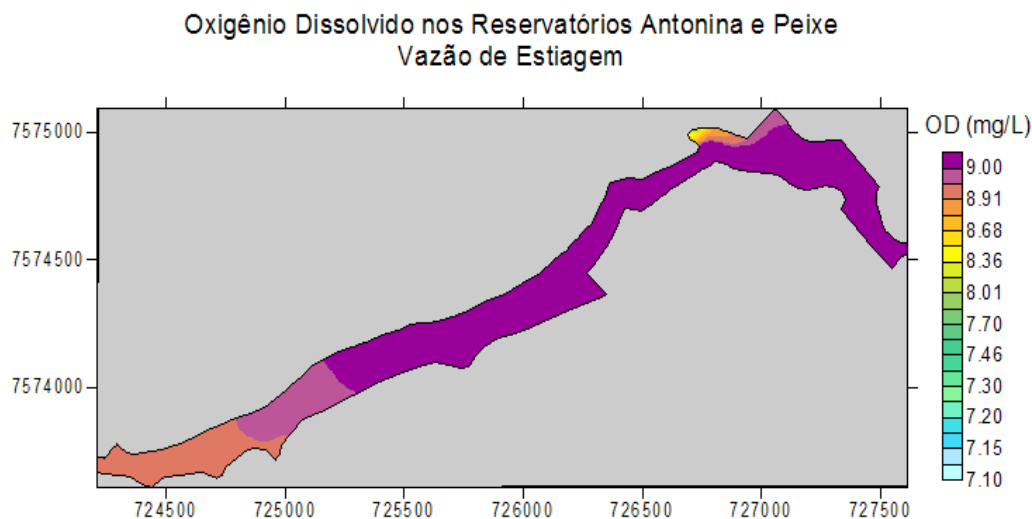


FIGURA 2.89
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE OD NOS RESERVATÓRIOS
DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO COM
CENÁRIO DE VAZÕES DE ESTIAGEM

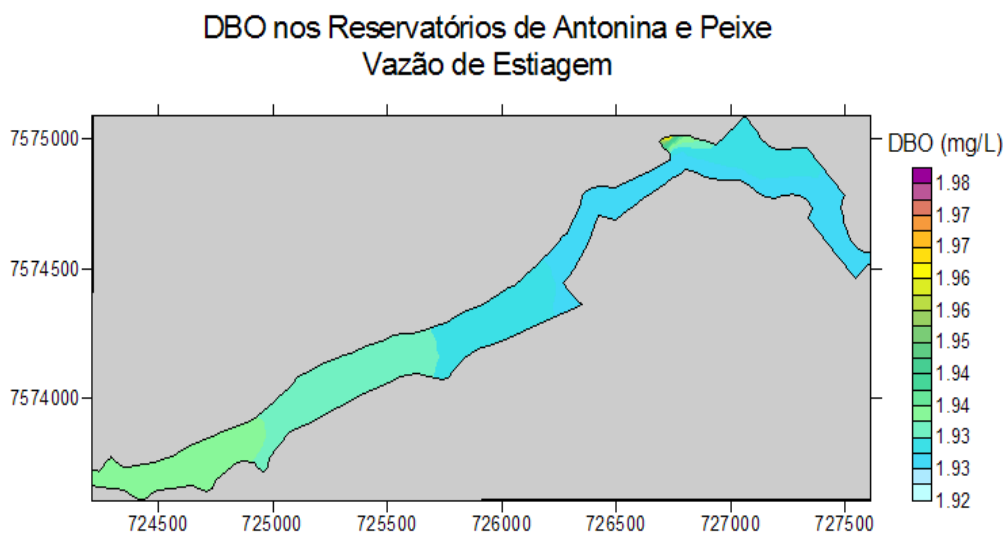


FIGURA 2.90
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE DBO NOS RESERVATÓRIOS
DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO COM
CENÁRIO DE VAZÕES DE ESTIAGEM

As concentrações de amônia, nitrato e fósforo total apresentaram o mesmo padrão de distribuição espacial, conforme ilustrado nas Figuras 2.91 a 2.93. É possível perceber a

dispersão da pluma destas substâncias, com concentrações ligeiramente inferiores ao verificado no canal principal, geradas pelo aporte proveniente do tributário 1.

Amônia nos Reservatórios de Antonina e Peixe
Vazão de Estiagem

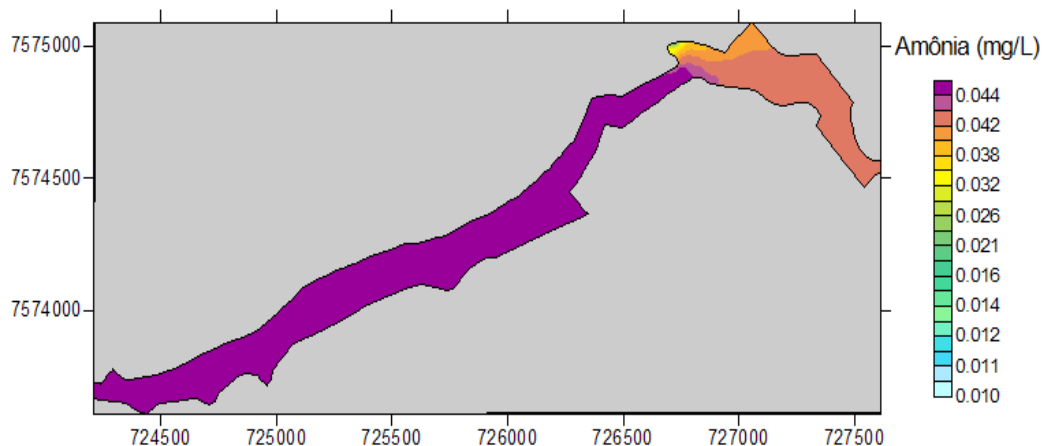


FIGURA 2.91
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE AMÔNIA NOS RESERVATÓRIOS
DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO COM
CENÁRIO DE VAZÕES DE ESTIAGEM

Nitrato nos Reservatórios de Antonina e Peixe
Vazão de Estiagem

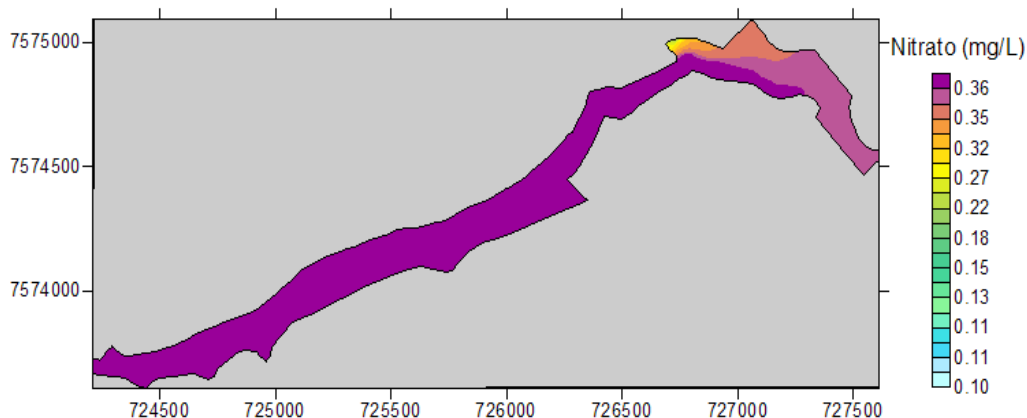


FIGURA 2.92
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE NITRATO NOS RESERVATÓRIOS
DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO COM
CENÁRIO DE VAZÕES DE ESTIAGEM

Fósforo Total nos Reservatórios de Antonina e Peixe Vazão de Estiagem

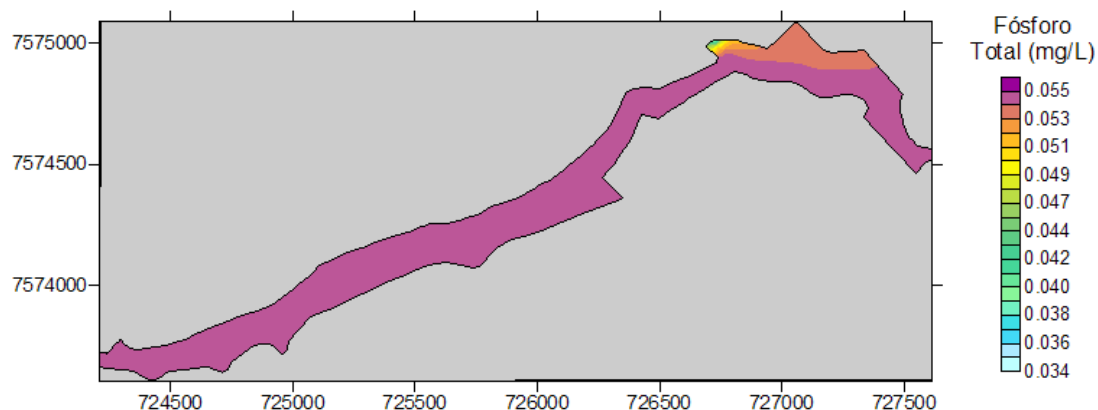


FIGURA 2.93
DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO TOTAL NOS
RESERVATÓRIOS DE ANTONINA E PEIXE APÓS A ESTABILIZAÇÃO
COM CENÁRIO DE VAZÕES DE ESTIAGEM

2.5 - Conclusões

Modelar um sistema de reservatórios que ainda serão formados, mostra a capacidade dos modelos numéricos hidrodinâmicos e de qualidade da água de subsidiar decisões voltadas à conservação da qualidade ambiental. Esta capacidade é obtida do sistema de equações derivadas das leis básicas da física e da química que simulam e determinam quantitativamente, mesmo que de forma simplificada e aproximada, as condições futuras de circulação e qualidade da água de corpos como os reservatórios do AHE Simplício.

O aprofundamento do atual estudo em relação ao anterior foi caracterizado principalmente por:

- utilização de um modelo diferente para as simulações da hidrodinâmica, qualidade da água e transporte de partículas, seja ele o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBAHIA. Este modelo, desenvolvido pela COPPE – UFRJ, é o resultado de mais de quinze anos de pesquisas, com resultados que demonstram sua alta qualidade, em diversos estudos onde foi necessário um amplo conhecimento da dinâmica física do meio ambiente, sendo utilizado como uma ferramenta imprescindível para diagnósticos e prognósticos qualitativos e quantitativos de fenômenos naturais e ações antrópicas potencialmente impactantes. Já foram desenvolvidas dez teses de doutorado e mais de 30 dissertações de mestrado até hoje, todas para o melhoramento e implementação de novos módulos no modelo;
- incorporação de novos contornos e profundidades para os reservatórios devido aos novos bota-foras, os quais melhoraram a circulação hidrodinâmica em vários pontos de cada um dos reservatórios;

- utilização de medições de qualidade da água dos tributários da margem esquerda dos reservatórios;
- refinamento das malhas numéricas;
- estudo de novas estruturas na modelagem do reservatório de Louriçal.

Os resultados da modelagem hidrodinâmica do reservatório de Anta, tanto com vazões máximas quanto com vazões mínimas, mostraram que este reservatório não apresenta regiões de estagnação significativas. Também foi mostrado que o rio Macuco, principal afluente deste reservatório, não tem o seu fluxo estagnado por causa do barramento natural do escoamento no canal principal.

Esta última afirmativa é reforçada pelos resultados de qualidade da água - seja no cenário de vazões de cheia ou no cenário de vazões de estiagem - em que são observadas plumas provenientes do rio Macuco com concentração de parâmetros de qualidade distintas das concentrações do canal principal.

A modelagem da hidrodinâmica do reservatório de Tocaia mostrou que não existem regiões de recirculação de grande importância que possam contribuir para a degradação da qualidade da água. Além disso, com a utilização do modelo de simulação do transporte lagrangeano de partículas, concluiu-se que o tempo de viagem de uma partícula do começo do braço do reservatório até a saída do reservatório deve ser próximo de quinze dias para o cenário de menores velocidades, no período de estiagem.

O fato dos resultados desse novo estudo mostrarem um cenário um pouco diferente do estudo anterior, se deve à utilização de malhas numéricas mais refinadas, de um modelo com melhor capacidade de simulação do transporte lagrangeano e, principalmente, ao planejamento de bota-foras no interior do reservatório, modificando-se o contorno e restringindo a passagem do fluxo. Essa última mudança causou o desaparecimento de regiões de maior área de recirculação e aumentou as velocidades no braço do reservatório. Dessa forma concluiu-se pela não consideração de um cenário com novas estruturas, pela falta de necessidade de acordo com os resultados obtidos. Devido ao pequeno volume do reservatório de Tocaia, o processo dominante no controle da qualidade da água foi a velocidade, deixando o “peso” das reações químicas menor, pois o transporte das substâncias se dá de forma muito rápida no canal principal.

Como comentado nos capítulos anteriores, áreas de recirculação podem provocar estagnação do fluxo e possível degradação da qualidade das águas. Um dos reservatórios com maior probabilidade de ocorrência desse fenômeno é o de Louriçal, principalmente nos períodos de baixa vazão. As simulações hidrodinâmicas desse reservatório em particular, mostraram que:

1. a utilização do material de bota-fora em áreas com geometria com favorecimento de ocorrência de recirculações eliminou completamente este risco. Este fato ficou claro na análise dos resultados das simulações para Louriçal, onde a área em na Figura 2.31, demarcando a posição e geometria de um bota fora, eliminou por completo uma região que apresentava intensa estagnação do fluxo;

2. nas regiões onde o material do bota-fora provocou somente uma diminuição da profundidade local, ou seja, bota fora submerso, ocorreu um aumento no campo de velocidade do fluxo o qual resultou em velocidades médias mais elevadas nas regiões de baixa circulação, como é o caso das áreas dos braços do reservatório;
3. as simulações realizadas com partículas traçadoras mostraram que o tempo de residência do reservatório de Lourical foi da ordem de dez dias para o cenário de vazão máxima. As simulações com vazões de estiagem geram tempos de residência da ordem de 25 dias;
4. as estruturas hidráulicas em conjunto com as áreas de bota-fora alteraram o fluxo de forma considerável, eliminando pontos de estagnação, com possíveis impactos positivos na qualidade da água.

Os resultados da modelagem hidrodinâmica do reservatório de Calçado demonstraram que há dois regimes bem diferentes dentro do reservatório – 1) o começo do reservatório, com área de seção transversal mais restrita e por isso com velocidades mais altas; e 2) a parte mais próxima à saída do reservatório com velocidades mais baixas causadas pela grande superfície de água combinada com a grande profundidade. Duas zonas de recirculação apareceram com clareza nos resultados. Porém, espera-se que as possíveis estagnações que aconteçam nessas áreas se desfaçam devido às variações no nível d'água e pela ação dos ventos (não considerados no presente estudo). A qualidade das águas desse reservatório apresentou resultados esperados, com acúmulo de DBO, nitrato, fósforo e amônia nas regiões de baixas velocidades.

Os reservatórios de Antonina e Peixe tiveram sua hidrodinâmica bastante influenciada pela presença de bota-foras que restringem a profundidade da água a sete metros e à aceleração provocada pelo estrangulamento no canal de conexão entre ambos os reservatórios. Estas acelerações e a pequena extensão longitudinal destes dois reservatórios juntos (em torno de 3,5 km) criaram resultados de qualidade de água dominados pelo transporte advectivo-difusivo.

Em geral, este estudo mostrou que a configuração do contorno da maioria dos reservatórios do AHE Simplício favorece a circulação de água por toda a sua extensão. Já no reservatório de Lourical, em que as descargas dos tributários são claramente controladas pelo fluxo principal, a proposta de diques como o apresentado neste estudo é viável do ponto de vista hidrodinâmico e de qualidade da água.

3 - PRINCIPAIS ASPECTOS LEGAIS E NORMATIVOS

No detalhamento, execução e acompanhamento do presente Subprograma deverá ser atendida a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

Conforme já ressaltado, esse Subprograma atende as Condicionantes nº 2.22 e 2.23 da LP 217/2005, a seguir transcritas:

“2.22 Aprimorar as alternativas de mudanças estruturais para eliminação da circulação horizontal nos braços dos reservatórios Anta, Tocaia e Louriçal, indicando a configuração ideal do defletor e o melhor posicionamento dos diques.”

“2.23 Detalhar no PBA as medidas de engenharia a serem adotadas para otimizar a circulação das águas nos reservatórios Anta, Tocaia e Louriçal (como implantação de defletores, diques e mecanismos de descargas de fundo e superfície), bem como as ações de controle, objetivando a redução do risco de eutrofização.”

Este Subprograma também atende a Condicionante nº 2.3 da LP 217/2005, a seguir transcrita:

“2.3 Detalhar todos os programas ambientais propostos nos estudos ambientais e os determinados pelo IBAMA, apresentando metodologia, responsável técnico e cronograma físico de implantação.”

4 - RESPONSÁVEL PELA EXECUÇÃO

O responsável pela execução do Programa é o empreendedor do AHE Simplício, a empresa FURNAS Centrais Elétricas SA.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOT, M. B & BASCO, R. (1989) Computational Fluid Mechanics, An Introduction for Engineering, Longman Group, UK Limited.

CANU, M., UMGIESSER, G., SOLIDORO, C. (2001) Short-term simulations under winter conditions in the lagoon of Venice: a contribution to the environmental impact assessment of temporary closure of the inlets. *Ecological Modelling*, v. 138, p. 215-230

CUNHA, C. L. N., MONTEIRO, T. C. M., ROSMAN, P. C. C. (2001) Modelagem bidimensional de transporte de escalares não-conservativos em corpos d'água rasos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.7, n. 2.

CUNHA, C. L. N, ROSMAN, P. C. C., MONTEIRO, T. C. M. (2003) Controle e Avaliação da Poluição em rios Usando Modelagem Computacional, *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Aceito em maio de 2003.

DEMUYNCK C., BAUWENS, W. De PAUWN N., DOBELAERE I., POELMAN E. (1997) *Evaluation of pollution reduction scenarios in river basin: application of long term water quality simulations. Water Science and Technology*, v. 35, n. 9, p. 65-75.

ESTEVES, F.A. 1998. Fundamentos de limnologia. Rio de Janeiro, Interciência. KALFF, J. 2002. *Limnology: Inland Water Ecosystems*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.

FISCHER, H. B. (Ed.) (1979), *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press Inc., New York.

HARLEMAN, D. R. F. (1978) *A comparison of water quality models of the aerobic nitrogen cycle. Personal report*, Massachusetts Institute of Technology.

LOSODO, T. M. & PIDRAHITA, R. H. (1991) Modelling temperature variation and thermal stratification in shallow aquaculture ponds. *Ecological Modelling*, v. 54, p.189-226.

MUHAMMETOGLU, A. B. & SOYUPAK, S. (2000) A three-dimensional water quality-macrophyte interaction model for shallow lakes. *Ecological Modelling*, v. 113, p. 161-180.

ROSMAN, P. C. C.(2000) Referência Técnica do SISBAHIA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL, Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil.

SELLERS, W. D. (1965) *Physical Climatology*. The University of Chicago Press/ Chicago & London.

SHENG, Y. P. & VILLARET (1989) Modeling the effect of Suspended Sediment Stratification on Bottom Exchange Processes. *Journal geophys. Res.*, v. 94, P.1429-1444.

THOMANN, R. V. AND MULLER, J. A. (1987) *Principle of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper and Row, New York.

UMGIESSER, G., CANU, D. M., SOLIDORO, C., AMBROSE, R. (2003). A Finite element ecological model: a first application to the venice Lagoon. *Environmental Modelling & Software*, 18: 131-145.