

CAPÍTULO X

Modelagem Hidrodinâmica (Modelo Computacional) e Avaliação da Capacidade de Suporte para Aquicultura Intensiva em Tanques Rede no Reservatório de São Simão (MG/GO)

Executores/Consultor:

Prof. Dr. Ricardo Motta Pinto Coelho,
Biol. M.Sc. Ecologia Simone Santos,
Biol. M.Sc. Ecologia Eliane Elias,
Eng. M.Sc. Daniel Villela Runkel de Sousa
& RIMA Meio Ambiente Ltda.

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho foi utilizada como ferramenta para modelagem computacional o SisBAHIA® (versão 8.5) – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – que trabalha com uma superposição de módulos. Trata-se de um sistema profissional registrado pela Fundação COPPETEC, órgão gestor de pesquisa da COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE (ROSMAN, 2011). A variação da quantidade de movimento advectivo foi simulada pelo modelo hidrodinâmico 2DH e 3D, que calcula as variáveis determinantes da circulação do corpo d'água, constituindo a base para os modelos de transporte.

O módulo do SisBAHIA contém um modelo para simular a circulação hidrodinâmica na versão 3D - capaz de calcular campos de velocidades tridimensionais, obtendo os perfis de velocidade ao longo da profundidade – e modelo bidimensional promediado na vertical (2DH), em que as variações das grandezas são médias na coluna d'água (PINHEIRO, 2008). Ambos os modelos foram utilizados, assim como o módulo que contém um modelo de transporte lagrangeano advectivo-difusivo com reações cinéticas, em versão 2DH e 3D.

A etapa de pré-processamento incluiu a obtenção de medidas quantitativas para as grandezas envolvidas no modelo. Estas informações consistem nos dados de entrada do modelo, que devem ser organizados e preparados de acordo com o modelo numérico elaborado (PAULA, 2011).

As etapas de implementação do modelo numérico hidrodinâmico incluíram a modelagem geométrica, com geração do mapa base (Fig. 01) e confecção de uma malha numérica (Fig. 02). Um sumário descrevendo todas as etapas da modelagem hidrodinâmica pode ser visto na Fig. 03, segundo Santos (2012).

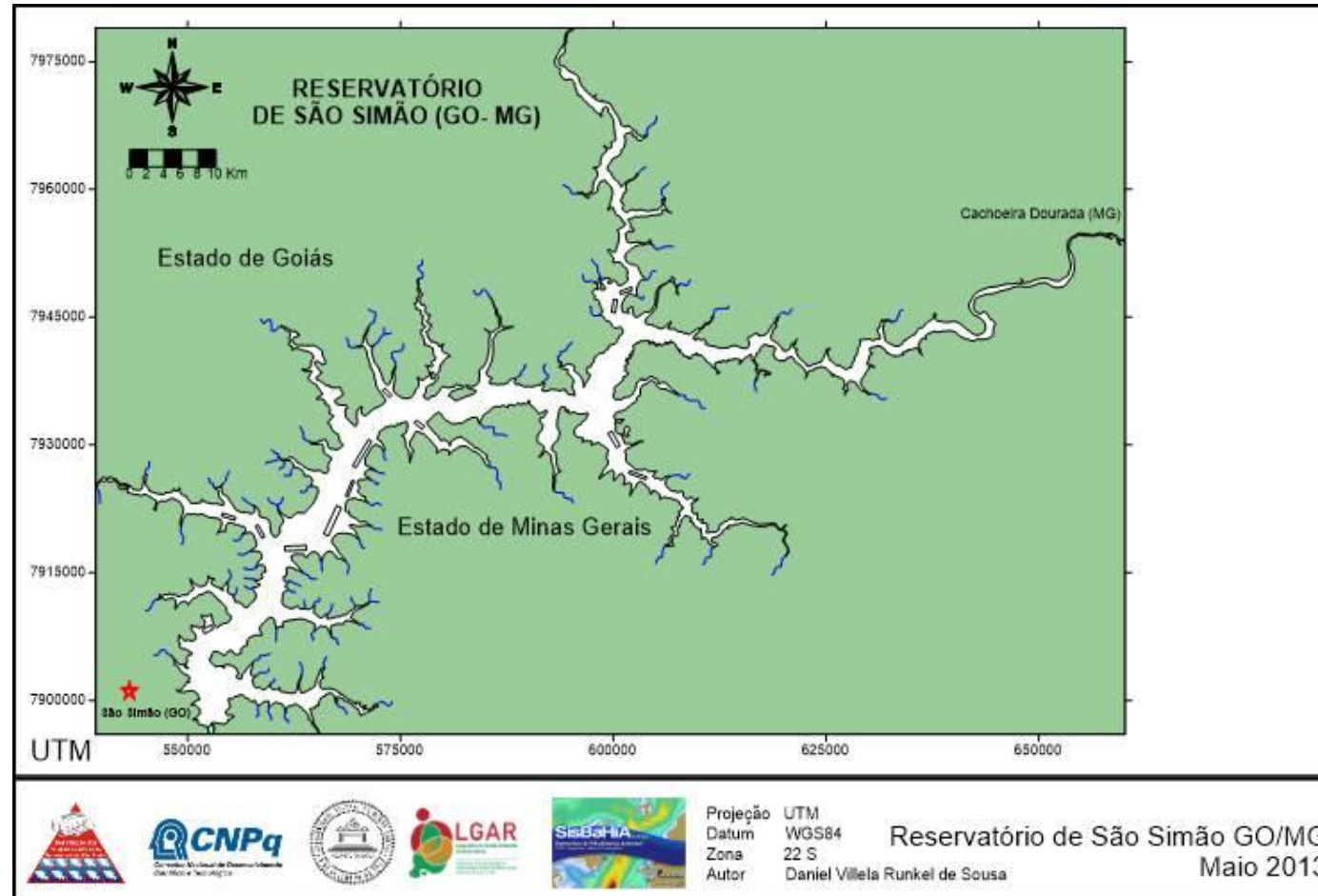


Figura 01 - Mapa base usado nas diferentes simulações com o software SISBAHIA. Os detalhes da calibração da imagem usada para a obtenção do shape file da orla do reservatório podem ser vistos no Cap. XX.

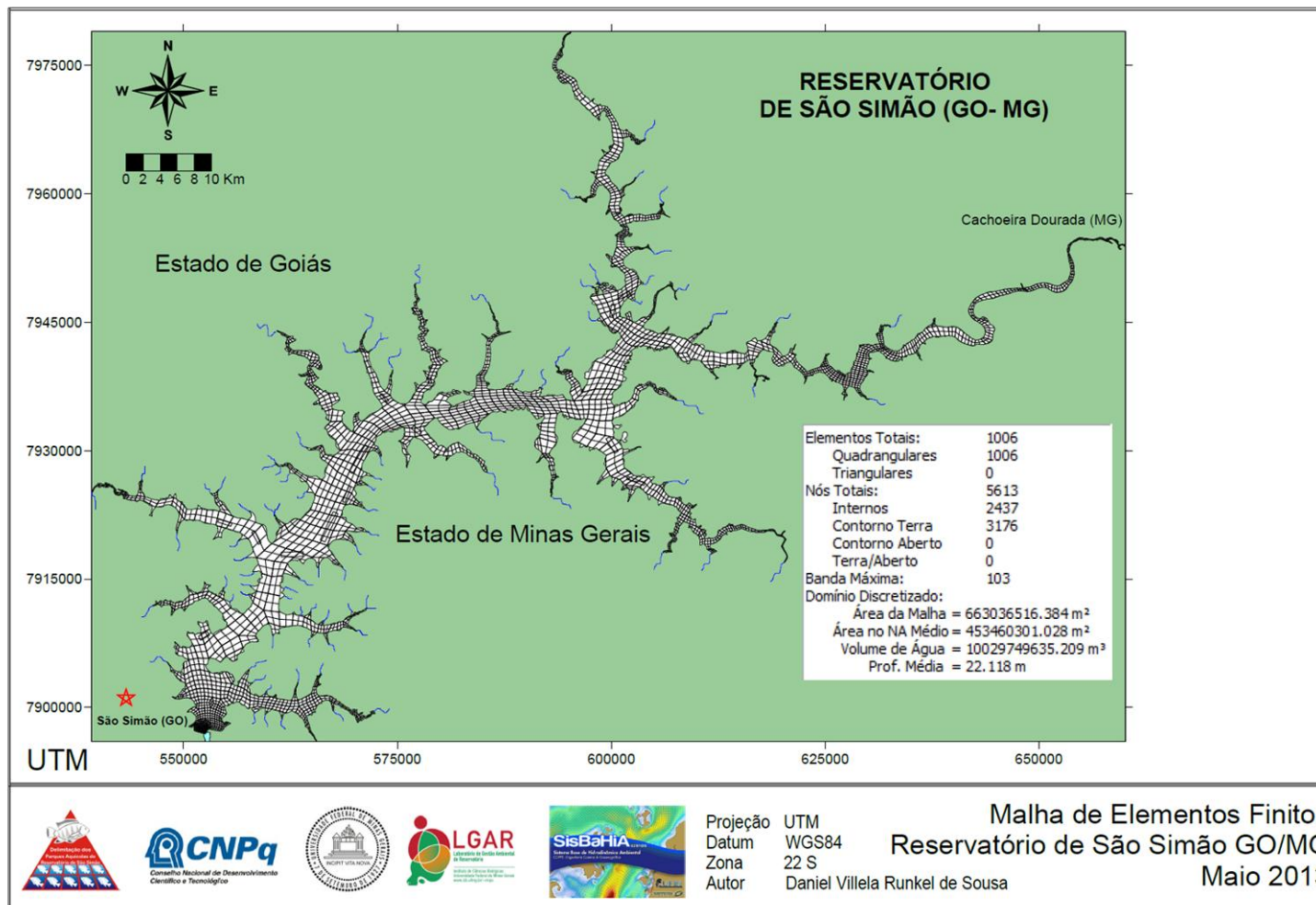


Figura 02 - Malha de elementos finitos gerada pelo programa ARGUS para o reservatório de São Simão.

A seguir, foram usados os dados de batimetria (Cap. VII), bem como dados de rugosidade do fundo nos pontos da malha numérica; a definição das condições iniciais; a definição das condições de contorno e; a definição dos dados de vento.

Dados de vento e vazão

Os dados de vento foram obtidos através do Banco de Dados do BDMEP-INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), nas seguintes localidades e períodos descritos na Tab. 01.

Tab. 01 - Nome, localização geográfica, altitude e períodos de operação e de uso de dados climatológicos usados nas modelagens, descritas nesse capítulo.

Estação: Ituiutaba - MG (OMM: 83521)
Latitude (graus): -18.95
Longitude (graus): -49.52
Altitude (metros): 560.00
Estação Operante
Início de operação: 16/11/1979
Período solicitado dos dados: 01/01/2012 a 31/12/2012
Estação: Capinópolis – MG (OMM: 83514)
Latitude (graus): -18.71
Longitude (graus): -49.55
Altitude (metros): 620.60
Estação Operante
Início de operação: 13/08/1969
Período solicitado dos dados: 01/01/2012 a 31/12/2012

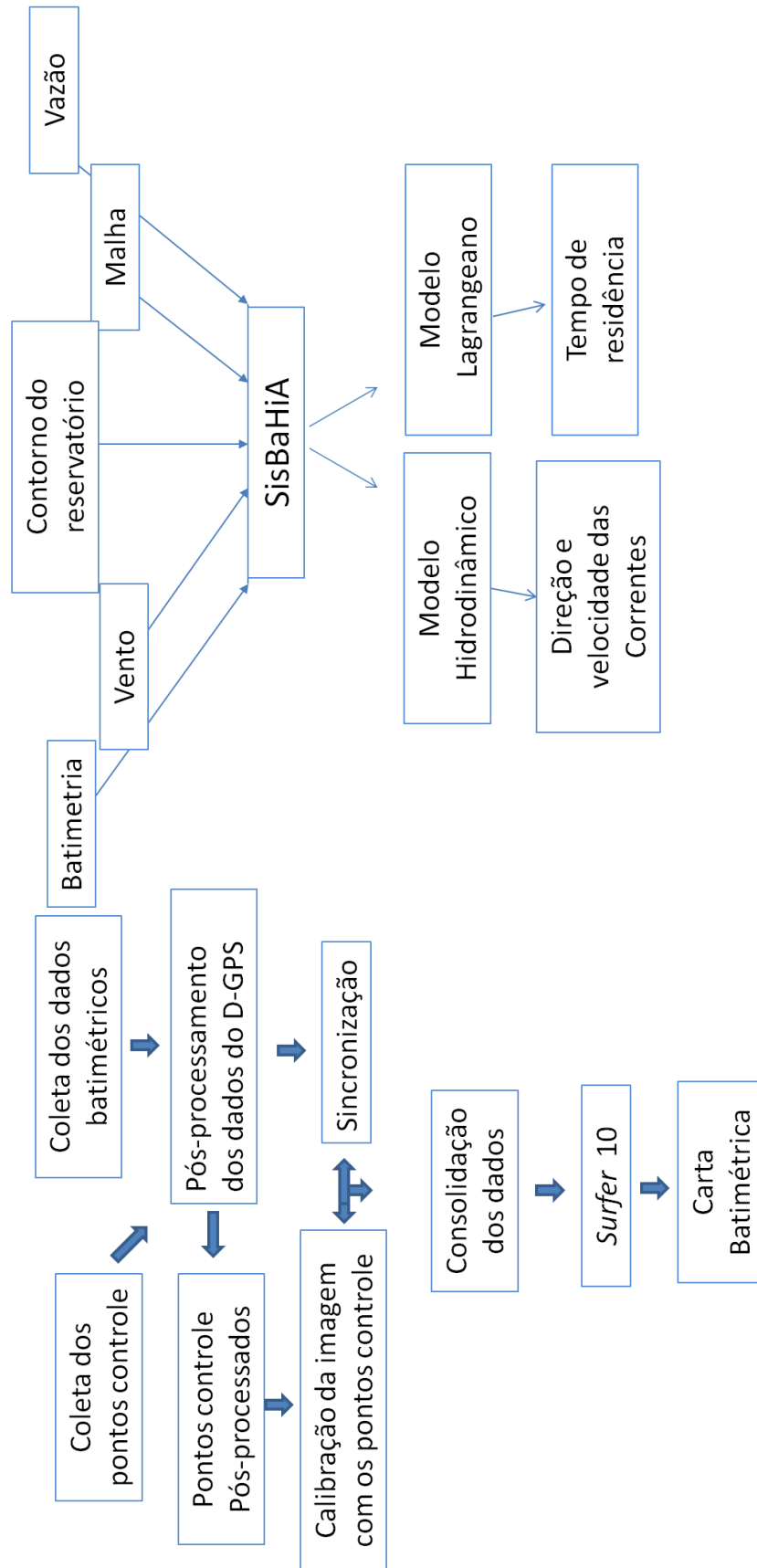


Figura 03 - Fluxograma simplificado das etapas envolvidas na confecção da carta batimétrica (à esquerda) e na calibração do modelo hidrodinâmico (à direita), de acordo com Santos (2012).

Os dados de vazão foram obtidos na CEMIG - Cia Energética de Minas Gerais. Os seguintes dados foram disponibilizados: vazão efluente total, vazão turbinada, vazão afluenta total, vazões lineares.

A distribuição das vazões foi feita de acordo com os dados disponibilizados pelas sondagens realizadas com o ADCP. A tabela, a seguir, traz a distribuição de vazões atribuídas aos principais tributários.

Tabela 02 - Distribuição das vazões segundo os principais tributários (que podem ser localizados nos diferentes nós da malha, apresentada na Fig. 02).

Vazões (m ³ /s)	Nós	Peso (%)
926	79	30,696%
926	104	30,696%
108	398	3,580%
14,25	470	0,472%
26,75	651	0,887%
14,25	771	0,472%
26,75	908	0,887%
26,75	1119	0,887%
14,25	1510	0,472%
14,25	1516	0,472%
57,8	1712	1,916%
57,8	1718	1,916%
26,75	1784	0,887%
57,8	1844	1,916%
310	2032	10,276%
57,8	2038	1,916%
57,8	2236	1,916%
12	2524	0,398%
4	2844	0,133%
4	3631	0,133%
5	3767	0,166%
70	3859	2,320%
15	3964	0,497%
70	4165	2,320%
9	4317	0,298%
26	4383	0,862%
68	4395	2,254%
3,7	5050	0,123%
7	5611	0,232%
Total:	3016,7	

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Condições Físicas

Na tabela “Batimetria & Rugosidade” encontra-se a tabela que relaciona os nós da malha de elementos finitos, suas coordenadas, profundidades e amplitude de rugosidade aparente. Os valores de rugosidade (Tab. 04) foram atribuídos homogeneamente pelo espaço, de acordo com as informações passadas pela equipe do projeto sobre o leito do rio e de acordo com a tabela a seguir, encontrada na Referência Técnica do SisBAHIA®:

Tabela 04 - Valores de rugosidade de fundo (SISBAHIA).

Leito de sedimentos		
Leito com transporte de sedimentos	0.0070m<math>\leq \Delta z < 0.0500\text{m}</math>	0.0070m
Leito com vegetação	0.0500m<math>\leq \Delta z < 0.1500\text{m}</math>	0.0500m
Leito com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	0.1500m<math>\leq \Delta z < 0.4000\text{m}</math>	0.1500m
Fundo de pedra ou rochoso		
Fundo de alvenaria	0.0003m<math>\leq \Delta z < 0.0010\text{m}</math>	0.0003m
Fundo de pedra lisa	0.0010m<math>\leq \Delta z < 0.0030\text{m}</math>	0.0010m
Fundo de asfalto	0.0030m<math>\leq \Delta z < 0.0070\text{m}</math>	0.0030m
Fundo com pedregulho	0.0070m<math>\leq \Delta z < 0.0150\text{m}</math>	0.0070m
Fundo com pedras médias	0.0150m<math>\leq \Delta z < 0.0400\text{m}</math>	0.0150m
Fundo com pedras	0.0400m<math>\leq \Delta z < 0.1000\text{m}</math>	0.0400m
Fundo com rochas	0.1000m<math>\leq \Delta z < 0.2000\text{m}</math>	0.1000m
Fundo de Concreto		
Fundo de concreto liso	0.0001m<math>\leq \Delta z < 0.0005\text{m}</math>	0.0001m
Fundo de concreto inacabado	0.0005m<math>\leq \Delta z < 0.0030\text{m}</math>	0.0005m
Fundo de concreto antigo	0.0030m<math>\leq \Delta z < 0.0100\text{m}</math>	0.0030m

Os valores de profundidade, mais comumente chamados de batimetria, foram interpolados a partir dos dados gerados nos estudos batimétricos (ver acima). Foram usados diversos arquivos, através de grid montado no programa Surfer, de espaçamento 55 metros, pelo método de *Krigging*. Valores iguais a zero foram atribuídos às margens o contorno fornecido, para facilitar a referência de nível, considerando-se essa a cota igual a 400 metros.

Nas seções de afluência ao reservatório buscou-se adequar a profundidade local à vazão relativa atribuída aos tributários, a ser detalhada adiante. Não havia dado batimétrico para nenhum tributário, logo os valores inferidos foram assim feitos para bom funcionamento do modelo hidrodinâmico, ainda que possuam lógica interna condizente com a experiência do modelador.

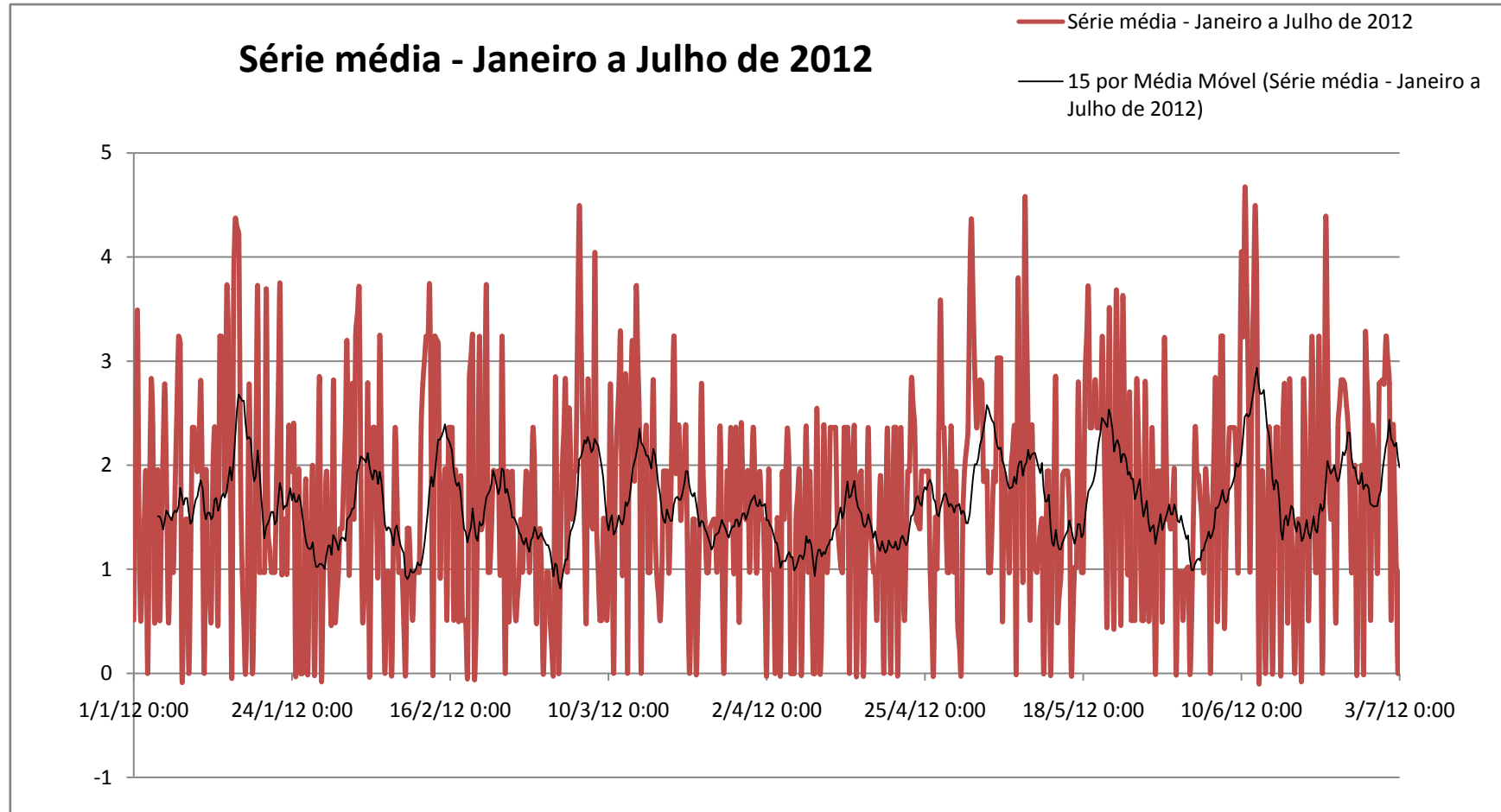


Figura 04 - Série de ventos na região de estudos no ano de 2012 (janeiro-julho) usada nas modelagens (médias das estações ITUIUTABA - MG - OMM: 83521 e CAPINOPOLIS - MG - OMM: 83514).

Condições Iniciais

A tabela de “Condição Inicial” (ANEXO) possui os números de cada nó da malha (Fig. 02) de elementos finitos, sua elevação e componentes U e V da velocidade. Quando apresentam componentes nulas significa que se trata de nós da fronteira de terra sem vazão afluente ou efluente. Tais valores foram produzidos por diversas rodadas com o intuito de “aquecer” o modelo, referenciadas apenas pelo nível inicial atribuído ao vertedouro no dia 01/01/2012.

Vazões e Níveis

As tabelas “Vazões de Entrada e Saída” e “Peso afluentes” (ANEXO) serviram para composição dos hidrogramas de descargas afluentes ao modelo. A partir das análises dos dados de ADCP (Cap. X), pode-se atribuir vazões, consideradas simultâneas, a pontos de vazões afluentes ao reservatório.

Em função dos pesos dentre tais tributários, distribuiu-se as vazões afluentes à barragem de São Simão, a partir da vazões totais fornecidas pela CEMIG e que podem ser vistas na planilha “cota e nível vazão afluente de São Simão”. Em alguns pontos foram aplicadas vazões afluentes irrelevantes, como de 1 litro/s, apenas para evitar erros de cálculo do modelo hidrodinâmico, como em seções de aparentes tributários que não receberam vazão por falta de informações sobre seu peso.

Da mesma planilha se obteve o nível na barragem de São Simão, que foi absorvido nos pontos relatados na tabela “Absorção de nível”. Subtraiu-se dos níveis fornecidos o nível de referência considerado, de 400 metros, pois entendeu-se pelos mapas de batimetria que esta era a correção local das profundidades.

Ventos

As tabelas “Capinópolis_2012” e “Ituiutaba_2012” acima contém os dados obtidos pelo BMEP, sistema do INMET de fornecimento de dados meteorológicos, para o ano de 2012. Foi necessária correção da direção, fornecida com valores divididos por 10 ($36 = 360^\circ$), assim como foi feita a correção da velocidade pela curva da Figura II-2-7, do *Coastal Engineering Manual*, Capítulo 2, de Resio e Vincent, 1977. A curva ajusta o vento de terra para água, sem considerar a distância. Sua digitalização pode ser encontrada na tabela “Correção de vento”.

Os valores das duas estações foram usados em média aritmética, tanto de direção quanto de velocidade, posteriormente interpolados pra intervalos de 6 horas por função quadrática (Fig. 4).

Regiões

A tabela “Polígonos ModReside” (ANEXO) formata as sete regiões de estudo do modelo Lagrangeano de tempo de residência, englobando os 14 polígonos requisitados para estudo sobre tempo de residência e prepara-os para a entrada no SisBAHIA®. Algumas regiões possuem mais de um polígono, mesmo porque para a modelagem de tal dado hidrológico é preciso alargar a área de estudo, abrangendo tipicamente seções mais extensas a montante e a jusante.

Ondas

Foram modeladas as ondas no reservatório, geradas por ventos, de 02/06/2012 a 16/06/2012, quinzena de maior média no primeiro semestre de 2012 (período da simulação hidrodinâmica). A duração do vento foi decidida por 3 horas por expressar valor comum, já que o tamanho da pista influi mais nas ondas de reservatório do que a duração do vento.

Os resultados das simulações feitas podem ser vistos nas Figs. 05 a 11.

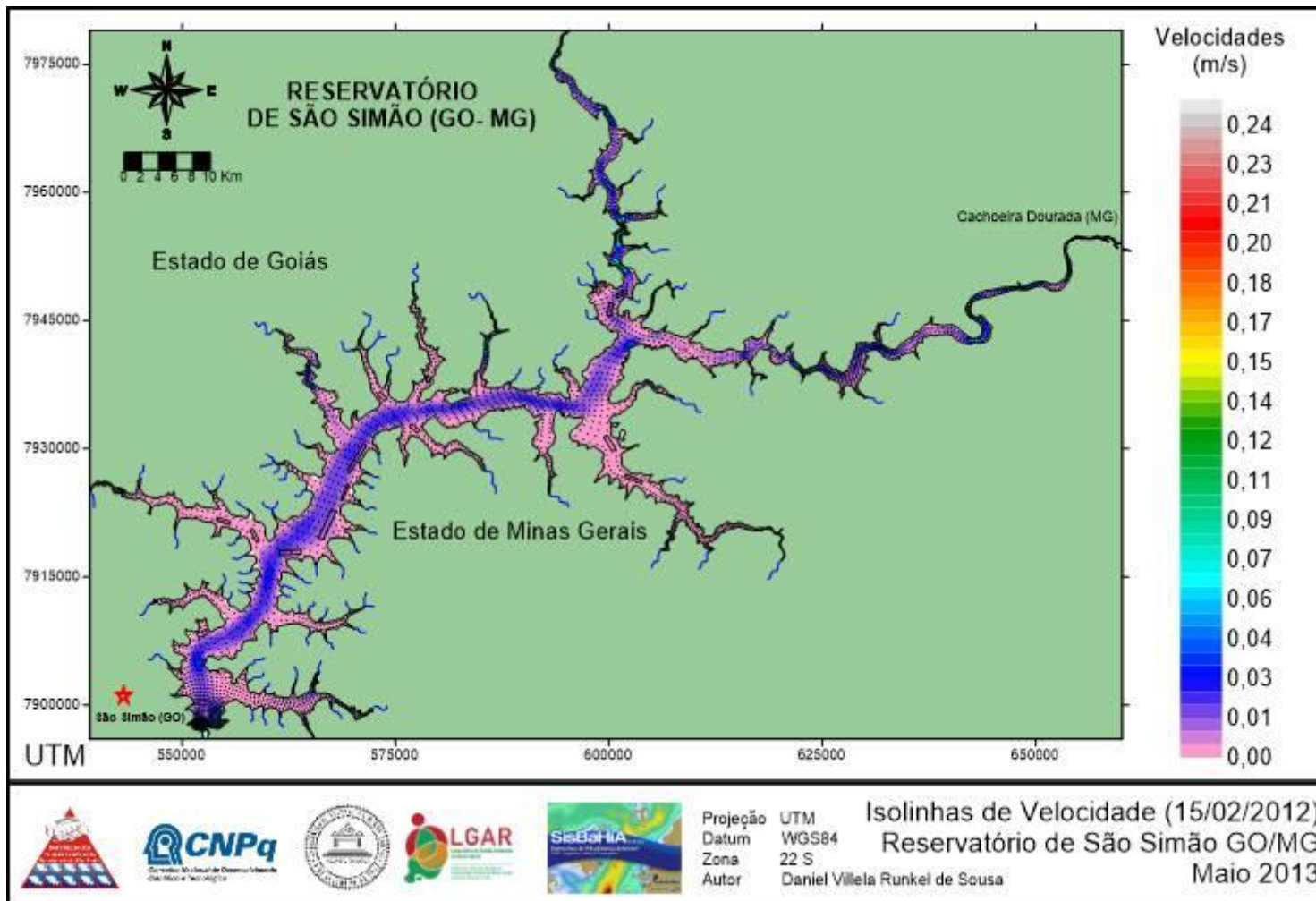


Figura 05 - Velocidades de corrente (modelagem para o dia 15 de fevereiro de 2012).

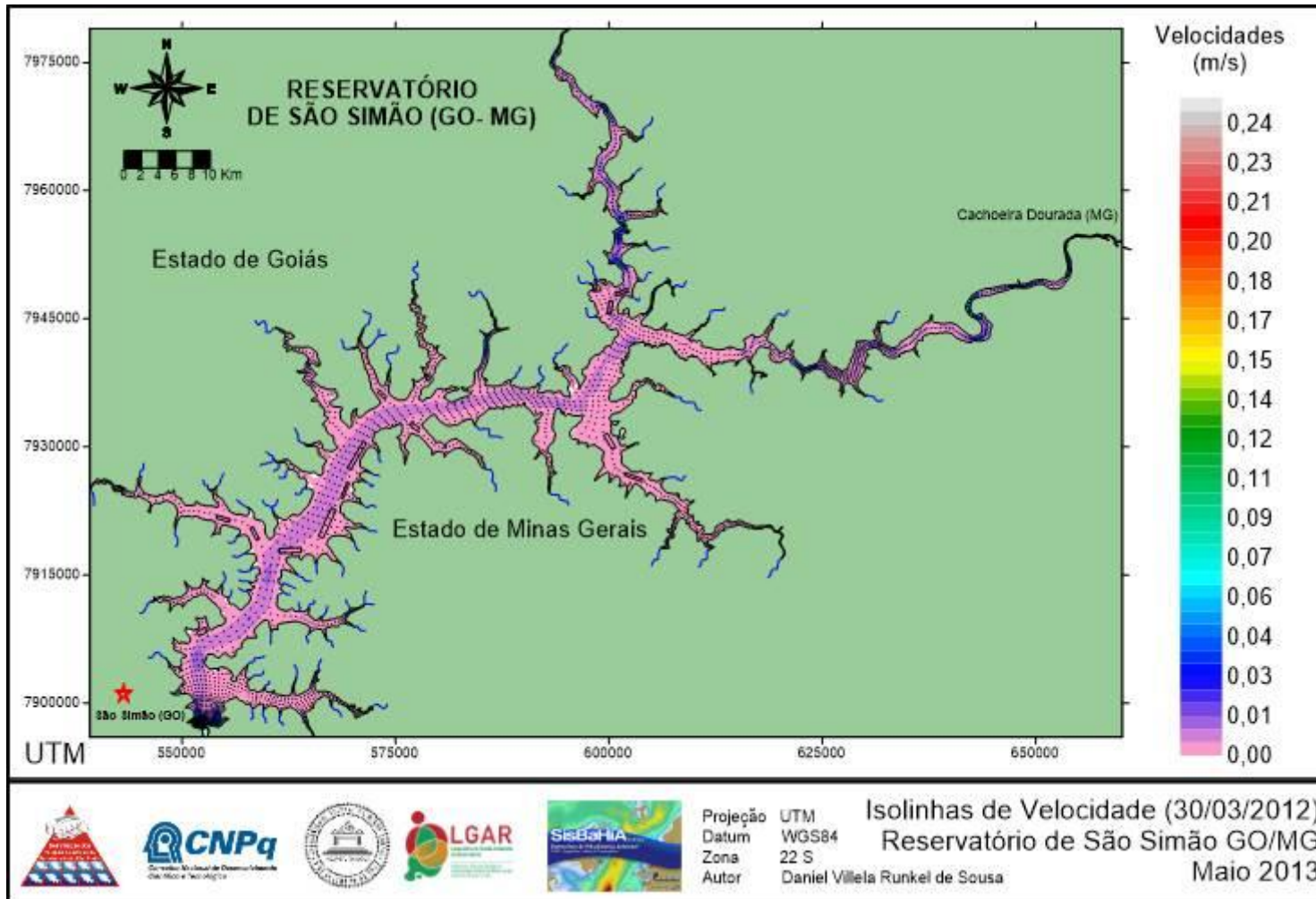


Figura 06 - Velocidades de corrente (modelagem para o dia 30 de março de 2012).

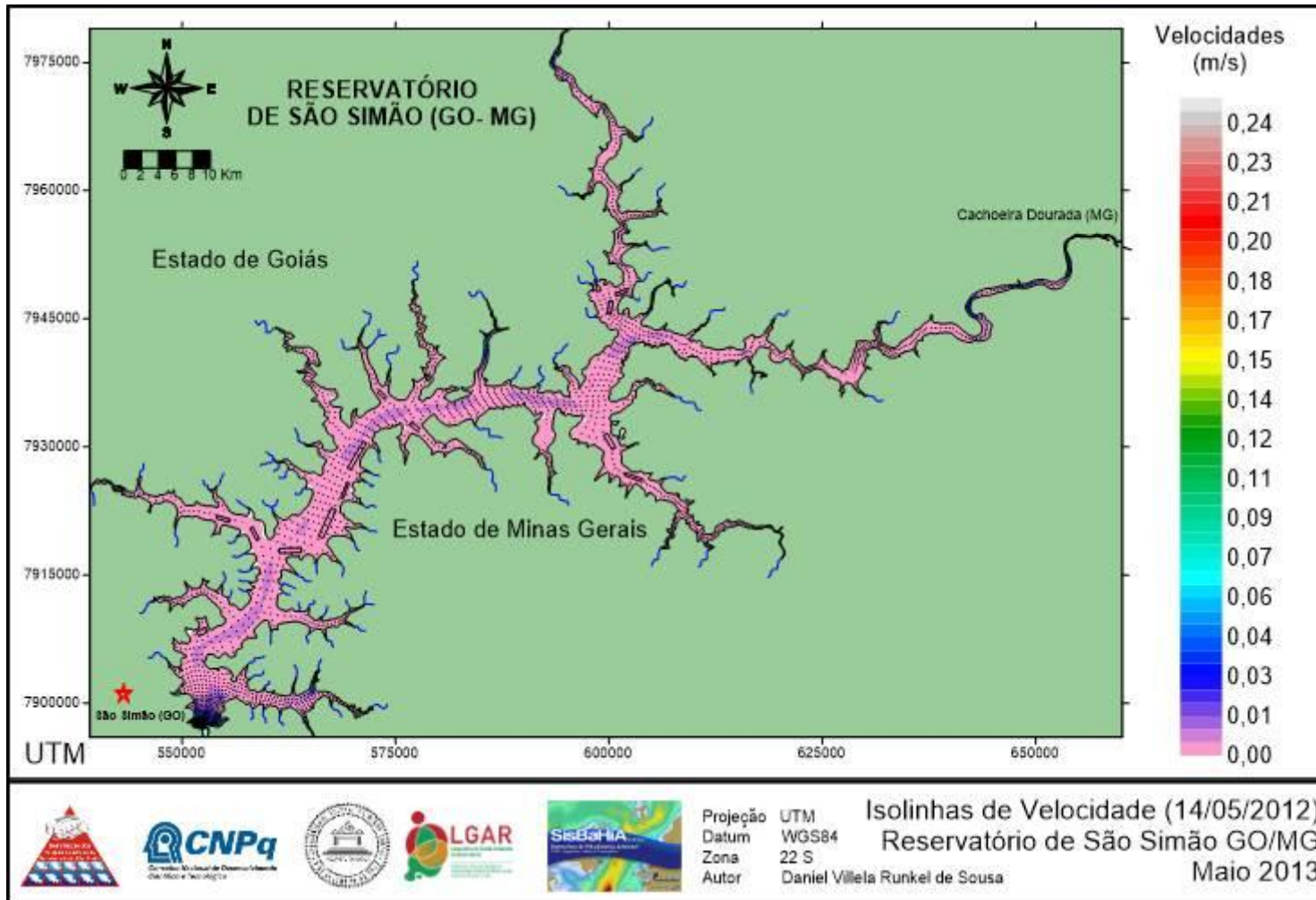


Figura 07 - Velocidades de corrente (modelagem para o dia 14 de maio de 2012).

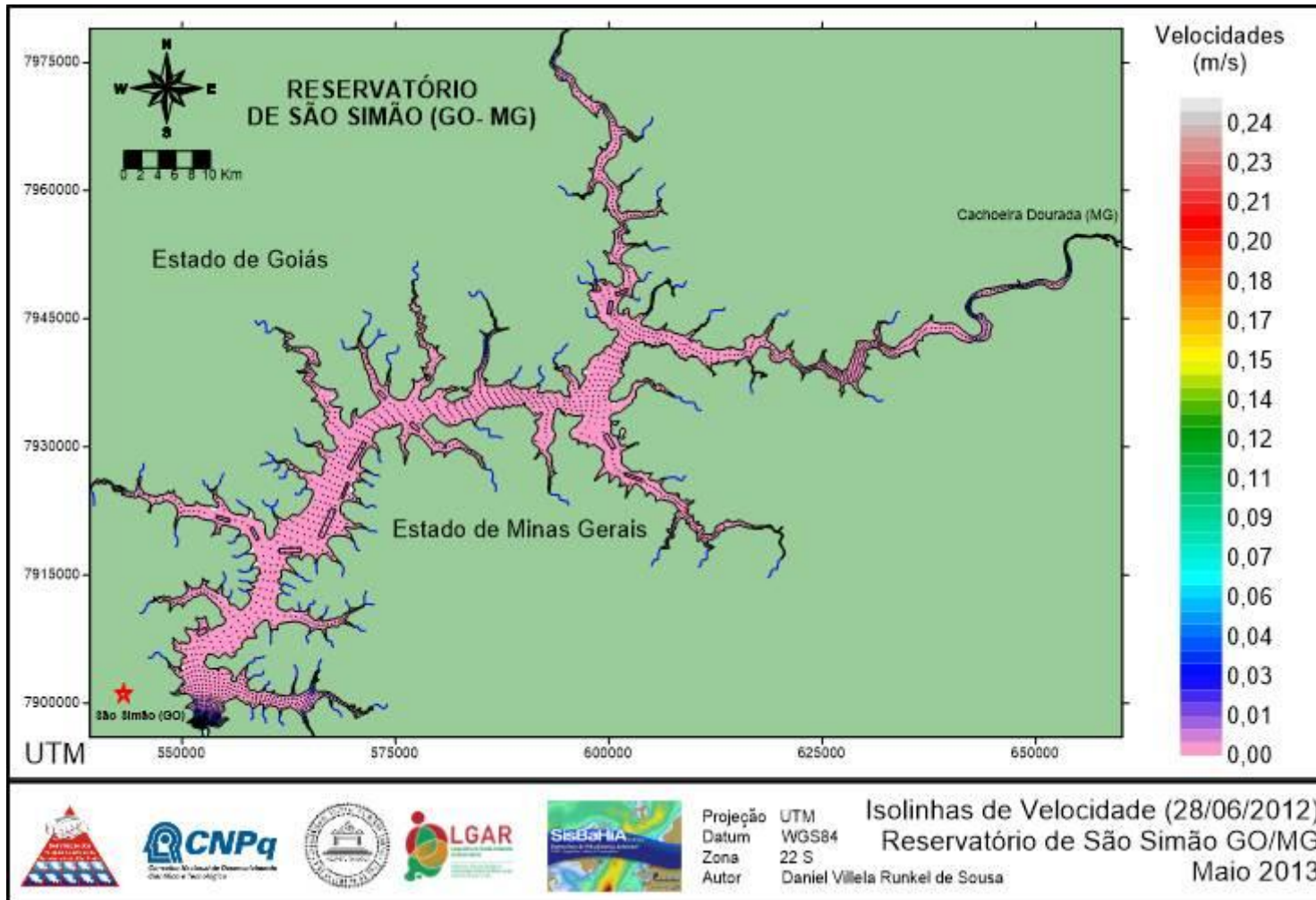


Figura 08 - Velocidades de corrente (modelagem para o dia 28 de junho de 2012).

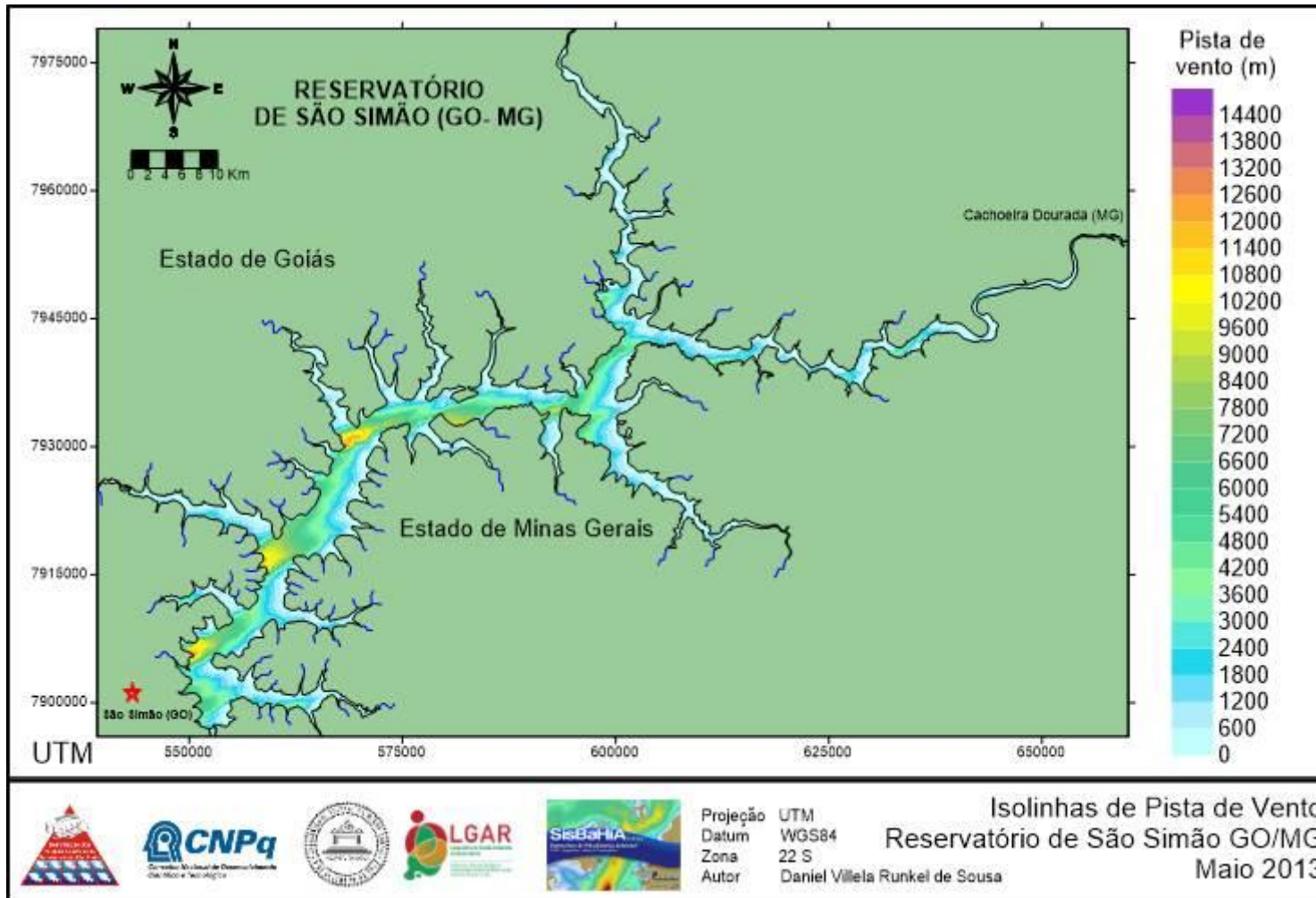


Figura 09 - Pistas de vento para maio de 2013, reservatório de São Simão.

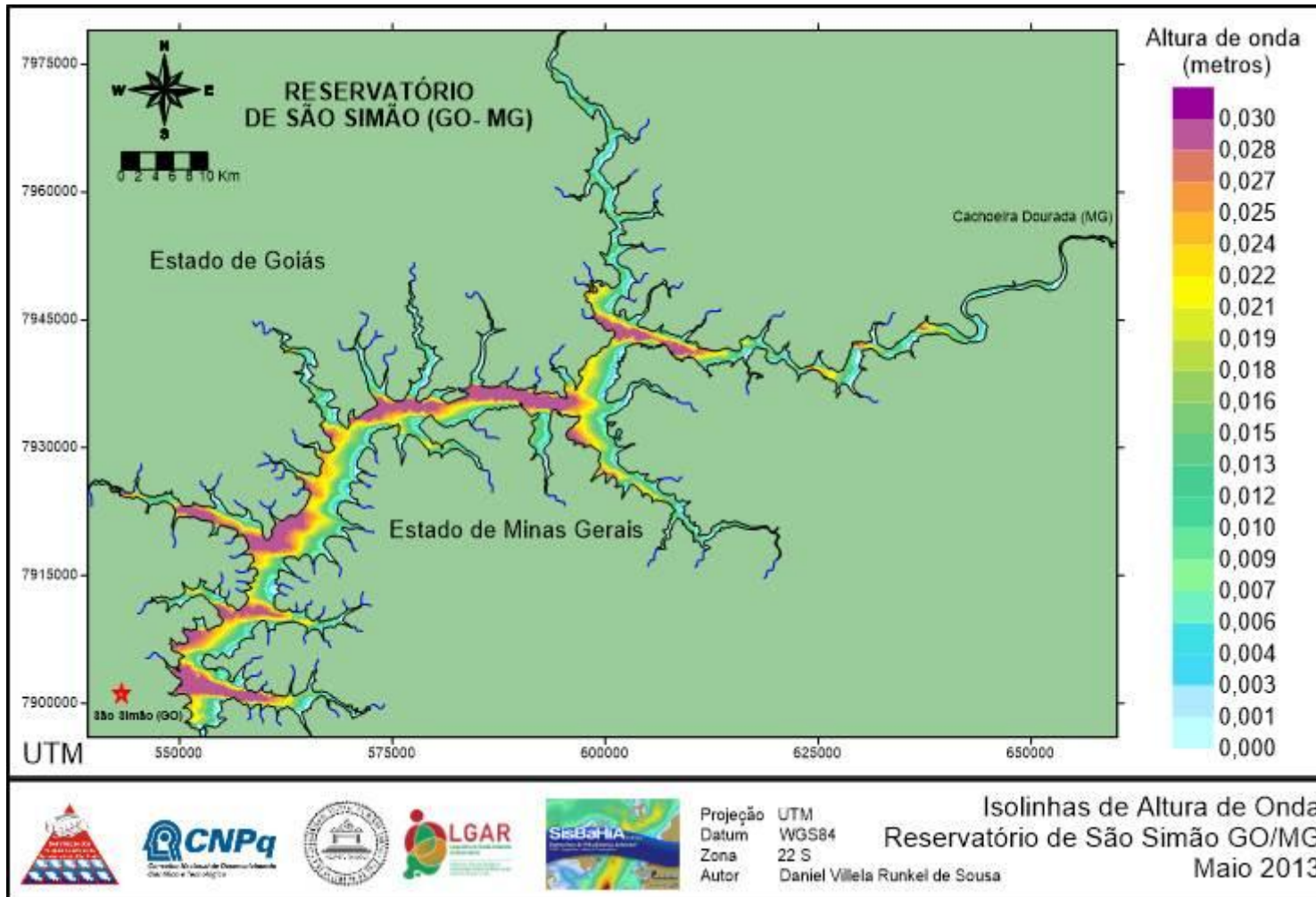


Figura 10 - Alturas de onda para o reservatório de São Simão (maio de 2013).

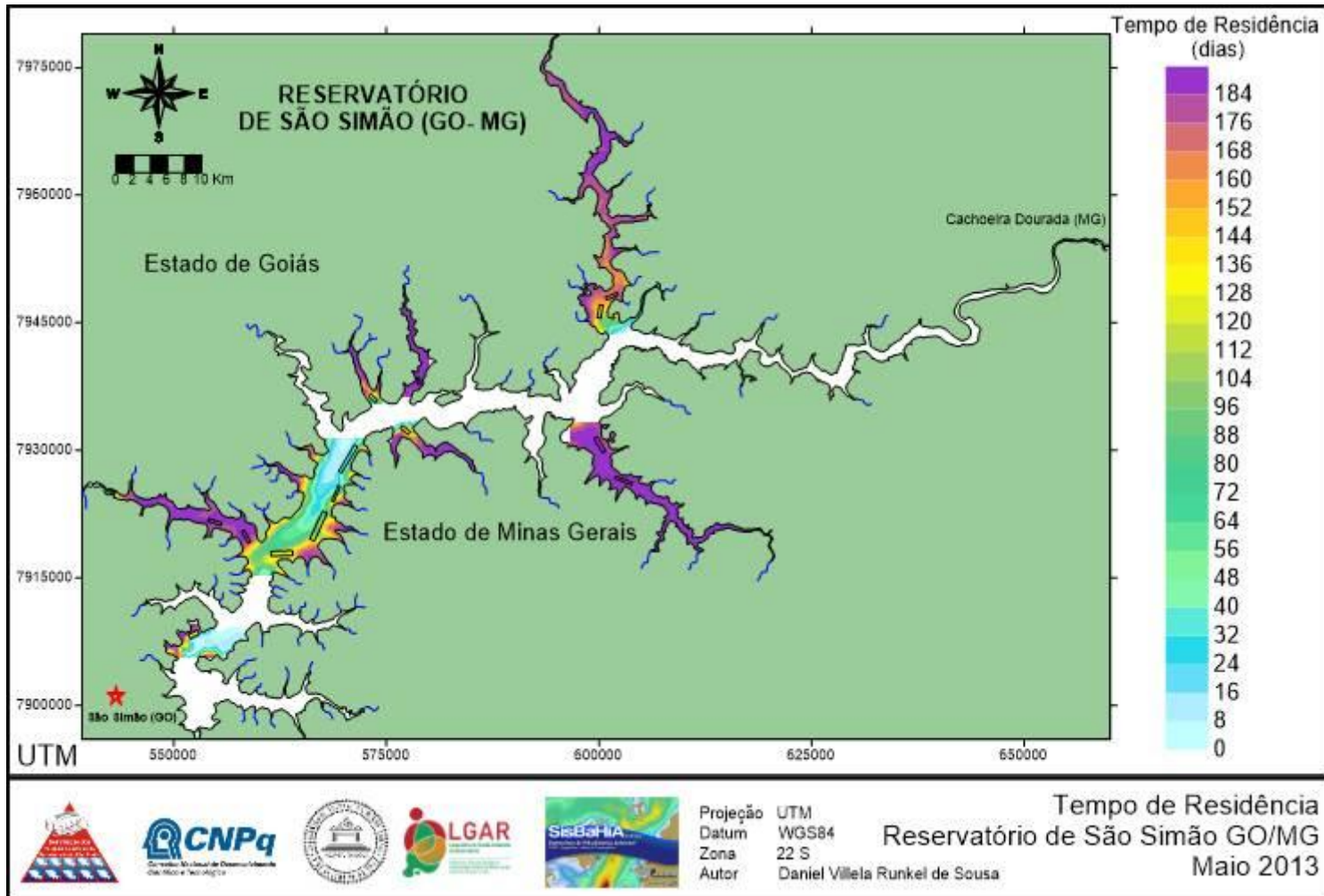


Figura 11- Tempos de residência (detenção) em dias para as diferentes regiões do reservatório de São Simão (período: 174 dias).

Considerações sobre a modelagem hidrodinâmica

Os resultados do estudo da modelagem hidrodinâmica, realizada com o auxílio do *software* SISBAHIA (COPPETEC, UFRJ) que estão apresentados nas figuras de 05 à 11 demonstram que o reservatório apresenta uma grande heterogeneidade espacial e temporal tanto nas vazões, velocidades de corrente, pistas de ventos, alturas de ondas e, sobretudo, nos tempos de residência.

As figuras de 5 à 8 mostram a evolução sazonal das velocidades de correntes superficiais no reservatório de São Simão. Duas características chamam a atenção: (a) há um progressivo decréscimo das velocidades com o avançar da estação seca; (b) a grande maioria dos braços do reservatório apresentam velocidades muito baixas de correntes.

Os ventos exercem profundas modificações na hidrodinâmica do reservatório de São Simão. No eixo central, formam-se pistas de ventos que muitas vezes excedem os 10.000 metros de extensão. Em consequência, várias porções do eixo central, principalmente do lado goiano, do braço do rio Alegre apresentam importantes formações de ondas. Essa característica, típica do eixo central do reservatório de São Simão, com a formação de ondas mais intensas no eixo central, principalmente do lado de Goiás justificam, também, a demarcação dos polígonos no eixo central, mas do lado de Minas Gerais onde os ventos são menos intensos.

Um dos resultados mais importantes da modelagem hidrodinâmica está representado na figura 11, que traz os tempos de residência. O reservatório de São Simão apresenta uma característica peculiar que consiste em tempos de residência (detenção) particularmente elevados em todos os braços, mesmo aqueles de grande porte (Tijuco e Alegre, por exemplo). Essa característica justifica claramente a grande diferença na qualidade de água do eixo central se comparada aquela dos braços laterais do reservatório, principalmente os braços formados pelos rios dos Bois, Tijuco-Prata, Patos, São Francisco e Preto. Essas diferenças já foram devidamente apresentadas e comentadas no capítulo de Limnologia.

Capacidade de Suporte e Modelo Zootécnico

O presente estudo irá demonstrar que a capacidade de suporte calculada pelo modelo de Dillon & Rilger (ver adiante) ficará muito aquém do que o reservatório pode realmente produzir, considerando as práticas usuais de cultivo em tanques rede que podem ser encontradas em diferentes reservatórios do Brasil. O objetivo desse capítulo, portanto, é o de demonstrar essa potencialidade do reservatório de São Simão. Para que esse potencial zootécnico possa ser plenamente realizado nesse ambiente, no entanto, são necessárias

medidas de gestão integrada de bacias hidrográficas que visem, sobretudo, a reduzir o aporte externo de fósforo que vem causando a eutrofização de alguns compartimentos do reservatório.

Esse capítulo resulta do trabalho do Eng. Irineu Feiden (doutorando no PG ECMVS) e do graduando em aquicultura da UFMG e bolsista IC do CNPq Felipe Cerqueira. O presente capítulo faz uma estimativa de produção baseando nos aspectos legais, histórico de operação dos empreendimentos aquícolas visitados em várias regiões do país e critérios zootécnicos.

O modelo a ser aqui apresentando irá utilizar as tilápias que são as espécies que melhores resultados oferecem em sistemas de tanques rede utilizados no Brasil. As tilápias são peixes considerados rústicos e onívoros, de fácil adaptação em tanques rede e suportam muito bem os sistemas de confinamento intensivo. São peixes que toleram baixas concentrações de oxigênio dissolvido e concentrações elevadas de amônia. A tilápia do Nilo, variedade tailandesa, é a linhagem mais utilizada no Brasil, bem como o sistema de tanques redes constituem o principal sistema comercial de seu cultivo (KUBITZA, 2005).

Os reservatórios podem proporcionar alta taxa de renovação de água dentro do tanque rede, que é o principal fator que viabiliza a grande produção de biomassa em alta densidade populacional. Esta densidade de estocagem em biomassa de peixes por unidade de volume pode variar entre 30kg/m³ a 250kg/m³, já que a renovação supre a elevada demanda por oxigênio e remove os dejetos produzidos diluindo-os no meio circundante.

A relação da área delimitada por parque aquícola e a área efetivamente aplicada a tanques rede está baseada principalmente na viabilidade econômica e na sua sustentabilidade ambiental. A Instrução Normativa Interministerial n° 6.10 de 28 de maio 2004 sugere deve-se manter uma relação 1:8 até 1:10 entre a área efetivamente ocupada pelas estruturas de cultivo e a área total a ser cedida. Isso é válido *para long-lines, varal/tomateiro, rack/tabuleiro e mesas*.

Esse capítulo pretende estimar a capacidade de suporte dos polígonos aquícolas demarcados em São Simão a partir de dois cenários usando dois tipos de estruturas de cultivo. A área total dos quatorze polígonos demarcados no presente estudo atingiu 1.081,54 ha. Considerando legislação, a batimetria da região, as mensurações de vazão tanto nos tributários quanto no eixo central, bem como as características limnológicas da água do reservatório, dois cenários são então propostos:

No **Cenário I**, foi utilizada uma razão de superfície variou entre 0,04 e 0,07. Isso quer dizer que a área efetiva ocupada pelos tanques ocupou de 4 a 7 % da área total do polígono aquícola. Essa razão garante uma diluição muito acima da determinação da normativa e foi tomada como margem de segurança. Nesse cenário, teríamos 27,26 hectares alocados em áreas efetivamente ocupadas em estruturas de cultivo tipo tanque rede (TR) de grande porte em todo o reservatório.

Optou-se por utilizar, nesse cenário, tanques de grande porte (380 m^3) que possuem uma forma cilíndrica, com as seguintes dimensões: 14 metros de diâmetro e 2,5 metros de profundidade.

No **Cenário II**, as razões TR:polígonos variaram entre 0,03 e 0,05. Isso quer dizer que a superfície ocupada pelos tanques variou entre 3 e 5% da área total do polígono. Nesse cenário, os polígonos demarcados e selecionados para esse modelo oferecem um total de 20,83 hectares efetivamente ocupados em estruturas de cultivo. Nesse caso, seriam utilizadas unidades (gaiolas) cúbicas de pequeno porte (27 m^3). Esses tanques possuem as seguintes dimensões: 3,0 m x 3,0 m x 3,0 m.

Os tanques nos dois cenários irão ficar dispostos em *long-line*, distribuídos dentro do polígono, sendo que a linha de polígonos está posicionada em paralelo ao fluxo d'água predominante. As distâncias entre as linhas devem ser de 10 metros para tanques redes de 3m x 3m e para os tanques rede de 14 m/diâmetro ela passa a ser de 14 metros no mínimo. A distância entre os tanques rede ao longo de cada linha deve ser no mínimo o seu comprimento. No caso dos tanques menores, esse espaçamento deve ser de 3,0 metros e no caso dos tanques cilíndricos maiores ela deverá ser de 14 metros. Essa disposição procura, ao mesmo tempo, garantir uma boa renovação da água, mas também um menor custo de manejo.

Considerando o acima exposto, podemos então estimar o potencial de cultivo para o número dos tanques redes para cada um dos dois cenários propostos acima. Para o para o Cenário I, que usará tanques rede com um volume de 380 m^3 , foi proposta uma densidade de estocagem de 35 kg/m^3 . Um projeto de *layout* usando esse cenário pode ser visto para o polígono 3 do parque aquícola de Sta. Vitória (vide adiante). Já para o Cenário II (tanques rede com um volume de 27 m^3), foi proposta uma densidade de 85 kg/m^3 (Tab. 05 e Fig. 12).

O Cenário I comportará então um total de 1.782 tanques rede que poderão produzir um total de aproximadamente 24.057 toneladas de peixe por ano. Já no Cenário II, as áreas aquícolas demarcadas em São Simão poderão suportar até 23.139 tanques rede de medidas menores o que permite uma produção bem maior, ou seja, uma produção de 53.219,7 toneladas de peixes ao ano.

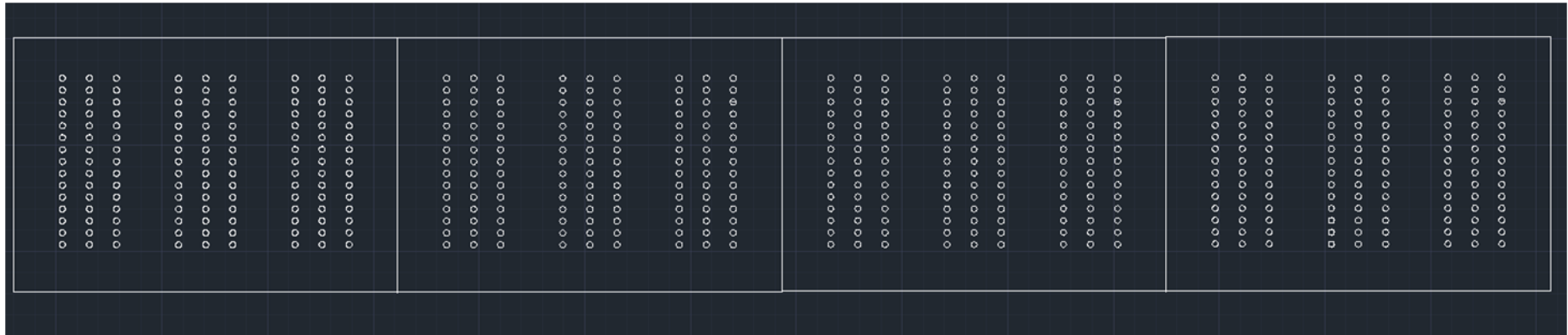
Considerando o fato de que a temperatura média das águas superficiais em São Simão situam-se dentro da faixa "ótima" acima, prevê-se que cada tanque poderá suportar até 2 ciclos anuais. Sendo assim, uma administração eficiente dos parques aquícolas de São Simão com a conclusão de pelo menos dois ciclos de cultivos anuais poderia reduzir os números de tanques em 50%, mantendo a mesma tonelagem acima para os dois modelos propostos.

É importante destacar aqui que as produções estimadas nesses dois cenários foram obtidas a partir de premissas zootécnicas, legais e considerando a realidade de operação de

uma série de empreendimentos aquícolas no país. Entretanto essas estimativas necessitam ainda de ser consolidadas pelo modelo de capacidade de suporte proposto por Dillon & Rigler (1974) que se baseia em uma série de parâmetros tais como a profundidade média, tempo de residência, valores iniciais e finais fósforo total e tempo de residência da água no reservatório, taxas de conversão alimentar, etc. Esse modelo será apresentado na próxima seção

Tabela 05 - Produções previstas para os Cenários I e II, respectivamente, para tanques rede de grande e pequeno volume.

CENÁRIO I										
	Pol 01	Pol 02	Pol 03	Pol 04	Pol 05	Total				
Área do polígono (ha)	56,87	160,69	217,36	76,36	59,65	570,94				
Número de Tanques Rede	270	432	540	297	243	1.782				
Área (ha) de TR	4,13	6,61	8,26	4,54	3,72	27,26				
Razão TR:Polígono	0,07	0,04	0,04	0,06	0,06	0,05				
Produção anual (toneladas/ano)	3.645,0	5.832,0	7.290,0	4.009,5	3.280,5	24.057,0				
CENÁRIO II										
	Pol 06	Pol 07	Pol 08	Pol 09	Pol 10	Pol 11	Pol 12	Pol 13	Pol 14	Total
Área do polígono (ha)	59,12	68,17	28,35	74,14	96,54	27,24	46,72	46,52	63,78	510,59
Números de Tanques Rede	2.376	3.024	1.008	3.600	4.851	1.248	2.052	2.064	2.916	23.139
Área (ha) de TR	2,14	2,72	0,91	3,24	4,37	1,12	1,85	1,86	2,62	20,83
Razão TR:Polígono	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	
Produção anual (toneladas/ano)	5.464,8	6.955,2	2.318,4	8.280,0	11.157,3	2.870,4	4.719,6	4.747,2	6.706,8	53.219,7
TOTAL										
Cenário I (toneladas/ano)	24.057,00									
Cenário II (toneladas/ano)	53.219,70									
Total I+II (toneladas/ano)	77.276,70									



Cenário I (Polígono 3)

- 540 tanques grandes, divididos em 36 *long lines* agrupadas em grupos de 3 fileiras de 15 tanques cada uma formando módulos de 45 tanques;
- 108 metros de distância entre as margens laterais do polígono e os módulos de tanques;
- 96 metros entre a margem superior e inferior do polígono e os módulos de tanques;
- 140 metros entre os módulos de tanques.

Figura 12 - Layout com a disposição de tanques para o Cenário I, aplicada ao polígono 3, do parque aquícola de Sta. Vitória. Projeto AUTOCAD, de autoria de Felipe Cerqueira (Grad. Aquicultura, UFMG).

Modelo de Dillon & Rigler

A expansão dos sistemas de aquicultura intensiva em tanques redes é frequentemente acompanhada de uma degradação do ambiente natural nas imediações da área de cultivo (Beveridge, 1987). Resíduos presentes nos efluentes da aquicultura têm sido comparados aos efluentes domésticos, adicionando grande quantidade de carbono, nitrogênio e fósforo ao ambiente. Os efluentes do cultivo, tais como fezes dos peixes, resíduos urinários e de ração não consumida entram nos corpos d'água. Os materiais particulados sedimentam e se acumulam no fundo do ecossistema e os solúveis podem formar "plumas" de qualidade ruim que podem estender por centenas de metros ou mesmo quilômetros dentro do reservatório.

A acumulação de matéria orgânica aumenta o consumo de oxigênio dos sedimentos, levando, em muitos casos, a um hipolimnion anóxico o que gera conseqüências ecológicas negativas tais como mudanças de espécies e desequilíbrios no funcionamento de todo o ecossistema.

A liberação de nutrientes dissolvidos, como fosfato e amônia podem estimular a produção fitoplâncton nas águas abertas no entorno dos empreendimentos aquícolas. O aumento da biomassa algal acarreta uma elevação do consumo de oxigênio durante a decomposição, acelerando o conhecido processo de eutrofização dos ambientes lacustres.

Para que os efeitos nocivos da eutrofização não sejam acelerados ao redor de empreendimentos aquícolas, é fundamental observar a saciedade dos peixes, evitando o uso excessivo de ração, o que é muito comum de ser observado. A alimentação excessiva, além de incrementar os produtos metabólicos da atividade poluindo o ambiente, diminui a taxa de conversão ração: peso dos peixes e, conseqüentemente, a margem de lucro do produtor. Um dos subprodutos que podem advir de um manejo alimentar inadequado é o fósforo que constitui parte da ração de praticamente todas as espécies cultivadas no mundo.

O fósforo é requerido pelos peixes para crescer e mineralizar seus ossos e cartilagens. A principal fonte de fósforo para os peixes é a alimentação. Porém, um excesso de fósforo na alimentação não será absorvido pelos peixes e ainda poderá influenciar o crescimento de algas na água, diminuindo o oxigênio dissolvido, a qualidade da água e conseqüentemente o próprio crescimento de peixes.

A relação fósforo versus fitoplâncton (ou clorofila-a) tem sido extensamente discutida na literatura (Hakanson & Peters, 1995). Apesar de variações e desvios notórios, devidamente descritos na literatura especializada, a relação entre nutrientes, particularmente entre fósforo e a clorofila-a constitui-se em um dos pilares teóricos para descrever o processo de eutrofização na

Limnologia Moderna. Essa relação tem servido como fundamento para o cálculo da capacidade suporte de lagos e Reservatórios. E tem servido como fundamento a diversos modelos teóricos e práticos. Todos esses modelos se baseiam na aplicação das equações determinísticas que descrevem as respostas biológicas dos ecossistemas lacustres frente à aumentos nas cargas de nutrientes. Esses modelos fundamentam hoje muito do conhecimento atual do processo de eutrofização artificial, e.g., Vollenweider (1968); CEPIS (1990).

Um dos modelos mais testados e utilizados em Aquicultura é o modelo de Dillon & Rigler (1974). Esse modelo representa uma modificação do modelo original de Vollenweider (1968) e considera que a concentração de fósforo total [P] em um dado corpo d'água é determinada pela carga de P, pelo tamanho do lago (área e profundidade média), taxa de renovação da água (fração da coluna d'água perdida anualmente para jusante e a fração de P permanentemente perdida para o sedimento. Esse modelo pode ser sintetizado pela seguinte equação:

$$[P] = L*(1-R)/z*\rho,$$

Onde:

[P] é a concentração de P total em $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$

L é a carga total de P em $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$

Z é a profundidade média em metros

R é a taxa de sedimentação do P

ρ é a taxa de renovação da água em volumes por ano

O estudo limnológico realizado no reservatório de São Simão demonstrou a importância do tanto do fósforo quanto do nitrogênio como variáveis que possuem um alto poder de explicação para a variância observada na clorofila-a. Entretanto, o fósforo apresentou maior uma maior frequência de associações positivas com a clorofila-a. Foram, então calculadas as capacidades de suporte, levando em conta a concentração máxima permitida desse nutriente (segundo a resolução 357 CONAMA), ou seja, de 30 $\mu\text{g/L}$. de P- PO_4 sob a forma de fósforo total.

Para o cálculo das capacidades de suporte dos diferentes polígonos pré-definidos como áreas aquícolas no reservatório de São Simão, foram feitas algumas pressuposições que estão sintetizadas nas tabelas abaixo (Tabs. 6 e 7).

Tabela 06 - Parâmetros usados para a determinação da capacidade de suporte pelo método de Dillon & Rigler para os polígonos aquícolas demarcados no reservatório de São Simão.

Parâmetro do Modelo	Valor	Justificativa
Conteúdo de fósforo na ração	0,8 (%)	Valor fornecido pelo Prof. Wilson Rogério Boscolo da UNIOESTE
Taxa de conversão	1,5	Valor usualmente aceito como razoável para o modelo zootécnico da Tilápia. Segundo Kubitza (1999) esse valor pode variar de 1,4 a 1,8 para Tilápia.
Teor de fósforo no peixe	0,34 (%)	Alguns trabalhos suportam uma taxa bem maior, ou seja, 0,58% (MARENGONE e SANTOS, 2006).
Taxa de sedimentação	0,80 (%)	Valor ligeiramente maior do que o valor de 0,77 (Starling et al. 2005) usado no presente estudo. O valor de 0,77 é mais adequado para ambientes temperados onde a água apresenta maior viscosidade.
Valor de fósforo inicial	Variável	Foram usados os valores de fósforo total medidos em locais próximos aos polígonos no mês de outubro de 2012. Vide Fig. 13 adiante.
Valor final de fósforo total	30 µg/L	CONAMA 357
Profundidade média	Variável	Profundidade média derivada dos estudos de batimetria feitos na região do polígono
Tempo de detenção	Variável	Tempo de residência da água oriundo dos estudos de modelagem hidrodinâmica (Fig. 11) acima.

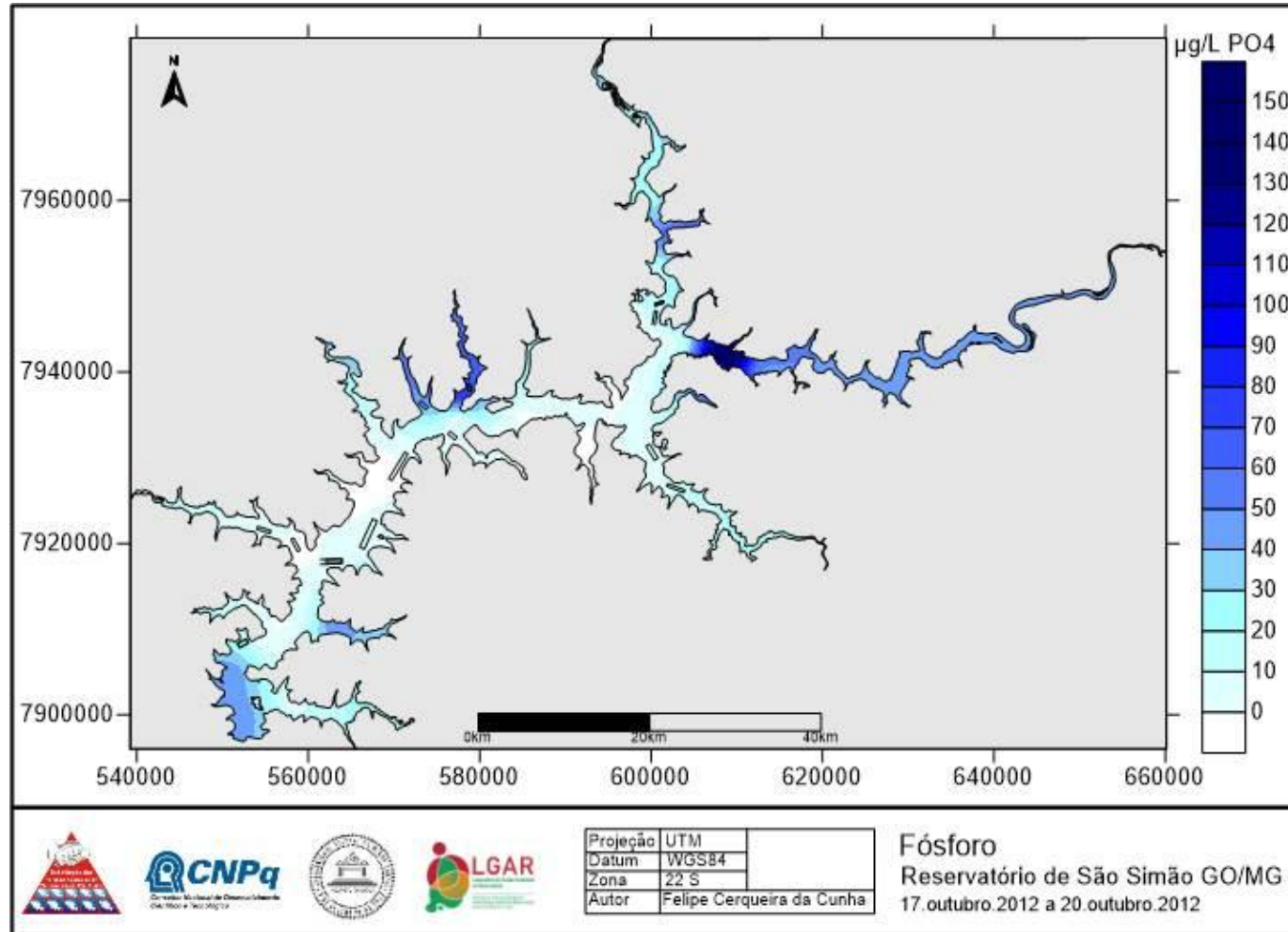


Figura 13 - Concentrações sub-superficiais de fósforo total da água no reservatório de São Simão em outubro de 2012.

Tabela 07 - Parâmetros usados para o cálculo das produções em tanques rede nos polígonos demarcados no reservatório de São Simão.

DADOS DE ENTRADA DO MODELO	POLÍGONOS AQUÍCOLAS - RES SÃO SIMAO												
	Pol 1	Pol 2	Pol 3	Pol 4	Pol 5	Pol 6	Pol 7	Pol 8	Pol 9	Pol 10	Pol 11	Pol 12	Pol 13
Conteúdo de Fósforo na ração (%)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Taxa de Conversão Alimentar T.C: 1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Teor de Fósforo no Peixe (w/w) (%)	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Taxa de Sedimentação (%)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Concentração de Fósforo Inicial mg/m3	0,16	0,91	3,6	4,6	0,01	2,83	10,9	15,8	11,3	4,9	30	30	5,3
Concentração de Fósforo Final mg/m3	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Profundidade (m)	24,2	32,7	37,9	37,8	32,2	19,8	24,3	20,9	20,8	23,6	22,2	17,9	29,8
Tempo Detenção (Mês)	0,9	2,5	3,1	4,0	6,1	6,1	4,3	5,6	6,1	6,1	6,1	3,5	4,4
Área (ha)	56,87	160,69	217,36	76,36	59,65	59,12	68,17	28,35	74,14	96,54	27,24	46,72	46,52

Tabela 08 - Produção, número de gaiolas (cenário I) e percentual de ocupação, área efetivamente usada e área demarcada de cada polígono no reservatório de São Simão.

	Pol 1	Pol 2	Pol 3	Pol 4	Pol 5	Pol 6	Pol 7	Pol 8	Pol 9	Pol 10	Pol 11	Pol 12	Pol 13	Pol 14	TOTAL
Biomassa Total de peixes (ton/ano)	3.069,8	4.317,5	4.974,8	1.266,1	658,8	363,8	518,2	104,4	328,2	650,9	0,0	0,0	539,3	234,3	17.026,0
m ² de gaiola	30.698,2	43.175,4	49.748,0	12.660,9	6.588,2	3.637,6	5.181,7	1.044,5	3.282,1	6.508,6	0,0	0,0	5.392,6	2.342,6	170.260,4
Número de Gaiolas	7.674,6	10.793,8	12.437,0	3.165,2	1.647,0	909,4	1.295,4	261,1	820,5	1.627,1	0,0	0,0	1.348,2	585,7	42.565,1
% da Área do Polígono Aquícola Ocupado	5,4	2,7	2,3	1,7	1,1	0,6	0,8	0,4	0,4	0,7	0,0	0,0	1,2	0,4	17,5
Área a ser Requerida (5 em %)	27,0	13,4	11,4	8,3	5,5	3,1	3,8	1,8	2,2	3,4	0,0	0,0	5,8	1,8	87,6
Área de Zoneamento m ²	153.491,2	215.876,9	248.740,1	63.304,3	32.940,9	18.187,9	25.908,7	5.222,4	16.410,4	32.542,8	0,0	0,0	26.963,2	11.713,2	851.302,1
Área em Hectares (ha)	15,3	21,6	24,9	6,3	3,3	1,8	2,6	0,5	1,6	3,3	0,0	0,0	2,7	1,2	85,1
Área Delimitada (ha)	56,87	160,69	217,36	76,36	59,65	59,12	68,17	28,35	74,14	96,54	27,24	46,72	46,52	63,78	1.081,5

Considerações sobre os modelos de capacidade de suporte apresentados

Os dois modelos apresentados divergiram muito nos valores finais de produção prevista para os quatorze polígonos demarcados no reservatório de São Simão. O modelo zootécnico previu uma produção total anual da ordem de 77.276 toneladas por ano enquanto o modelo de Dillon & Rigler apresentou um valor total de apenas 17.026 toneladas ao ano. Essa diferença se justifica tendo em vista os seguintes fatores:

(a) o reservatório de São Simão apresenta valores de fósforo total muito mais elevados que outros reservatórios do sudeste já estudados pelo LGAR-UFMG (Três Marias, Furnas, Nova Ponte); as maiores concentrações de fósforo limitam muito os valores finais de produção previstos pelo modelo de Dillon & Rigler;

(b) os tempos de residência (detenção) nos braços laterais do reservatório de São Simão são muito elevados;

(c) utilizamos, no presente estudo, valores mais realistas de conteúdo de fósforo na ração. O valor tradicionalmente usado de 0,5% foi abandonado pelo valor mais realista o valor de 0,8% tomado a partir de consultas com especialistas que trabalham na área de produção de rações para Aquicultura no Brasil (com. pess. Prof. Wilson Boscolo, da UNIOESTE, Toledo, PR);

(d) optamos por usar, uma taxa de sedimentação da ordem de 0,8% ao invés do valor tradicionalmente usado de 0,77% considerando sobretudo as temperaturas mais elevadas registradas no reservatório de São Simão, se comparadas aos reservatórios de Furnas, Três Marias e Nova Ponte;

(e) os valores elevados de produção previstos pelo modelo zootécnico para os braços laterais não puderam ser sustentados pelo modelo de Dillon & Rigler. Os polígonos 11 e 12 ficaram impedidos de produzir devido às suas concentrações mais elevadas de fósforo total. No entanto, optamos por manter esse dois polígonos devido ao fato de que eles estão situados em duas pequenas sub-bacias de captação. Medidas localizadas de gestão ambiental poderão facilmente reverter esse quadro em um breve futuro.

Acreditamos, ainda, que há necessidade de se rever, através de estudos experimentais as taxas de sedimentação, os coeficientes de conversão alimentar, e os valores médios de fósforo na biomassa de tilápias para um melhor ajuste do modelo de Dillon & Rigler à realidade do reservatório de São Simão. Esses estudos poderiam ser contratados pelo Ministério da Pesca

e deveriam ser executados por diferentes universidades brasileiras observando as diferenças regionais do país.

É interessante notar que, apesar da baixa capacidade de suporte prevista nesse estudo, o reservatório de São Simão pode, hoje, ser considerado um dos reservatórios mais produtivos em termos de produção de peixes em tanques rede do sudeste do Brasil. Acreditamos que uma melhor gestão ambiental das diferentes sub-bacias que compõem o reservatório, particularmente uma gestão voltada à uma diminuição da carga externa de fósforo, poderá resultar em melhoras específicas, com uma melhoria a curto prazo, da qualidade de água de todo o reservatório.

3. REFERÊNCIAS

- BEVERIDGE, M. C. M. 1987. **Cage Aquaculture**. Fishing News Books, Ltd., England. 351 pp.
- CEPIS. 1990. **Metodologias simplificadas para la evaluacion de eutrofication em lagos calidos tropicales**. Programa Regional CEPIS/HPE/OPS.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **RESOLUÇÃO N 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005**, D.O.U. 053, de 18/03/2005, págs. 58-63. Alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011 e dispõe sobre a classificação dos corpos de água e dá diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
- DILLON, P. J. & F. H. RIGLER. 1974. **A test of a simple nutrient budget model predicting the phosphorus concentration in lake water**. J. Fish. Res. Bd. Can. 31: 1771-1778.
- HAKANSON, L. & PETERS, R.H. 1995. **Predictive Limnology**. Methods for Predictive Modelling. SPB Academic Publishing. Amsterdã. 460pp.
- INSTRUÇÃO NORMATIVA INTERMINISTERIAL Nº 06, DE 31 DE MAIO DE 2004. **Estabelece as normas complementares para a autorização de uso dos espaços físicos em corpos d'água de domínio da União para fins de aqüicultura, e dá outras providências**. 34 p.
- KUBITZA, F. **Tilápia: Tecnologia e Planejamento na Produção Comercial**. 2000.
- KUBITZA, F. 2005. **Tilápia em água salobra e salgada**. Panorama da Aquicultura, Rio de Janeiro, v. 15, n. 88, p. 14-18.
- ONO, A. E. & F. KUBITZA. 2003. **Cultivo da peixes em tanques-rede**. 3. ed, Jundiaí: Agua & Imagem, 2003. 126p.
- PAULA, T. P. 2011. **Diagnóstico e modelagem matemática da qualidade da água em trecho do rio Piabanha/RJ**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PINHEIRO, L. A. 2008. **Vulnerabilidade e sensibilidade ambiental de praias da Baía de Guanabara ao derramamento de petróleo e derivados**. Dissertação (Mestrado em Ciências - Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- RESIO, D.T. & C.L. VICENT. 1977. **Coastal Engineering Manual**, Capítulo 2, U.S. Army Corps of Eng. USA.
- ROSMAN, P. C. C. 2011. **Referência Técnica do SisBaHiA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL**. Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil.
- SANTOS. S. 2012. **Morfometria, compartimentação e hidrodinâmica de um reservatório periurbano tropical: prognósticos sobre o tempo de vida útil do reservatório de Vargem das Flores, Minas Gerais, Brasil**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em

Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre da UFMG - PBG ECMVS, Belo Horizonte (MG). http://ecologia.icb.ufmg.br/~rpcoelho/art_pdf/Diss_Simone_Santos.pdf

STARLING, F., C. PEREIRA & P. ANGELINI. 2005. **Definição da capacidade de suporte do reservatório de Furnas para o cultivo de tanques redes**. Relatório Final. 62 pgs.

VOLLENWEIDER, R. A. 1968. **Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication**. Tech. Rep.DA5/SU/68-27. OECD, Paris. 250 pp.