

Modelagem numérica bidimensional da hidrodinâmica e qualidade da água em reservatório: pré-processador para o modelo CE-QUAL-W2 aplicado ao reservatório Pereira de Miranda

Ernesto Molinas
ernestomolinas@gmail.com
Universidade Federal do
Ceará

**Francisco de Assis de Souza
Filho**
assis@ufc.br
Universidade Federal do
Ceará

Resumo

Atualmente, o nordeste brasileiro vive um momento onde os esforços para a maximização da oferta de água do ponto de vista da quantidade, por meio da açudagem, passam a perder viabilidade caso não sejam mantidas garantias do ponto de vista da qualidade. Neste contexto, se faz necessário o desenvolvimento de campanhas regulares de monitoramento que sirvam de suporte para a simulação numérica do comportamento de tais corpos d'água. Dentre as alternativas disponíveis, podemos citar o modelo bidimensional no plano vertical-longitudinal CE-QUAL-W2, disponibilizado gratuitamente pelo United States Army Corps of Engineers (USACE), conhecido como o “estado da arte” entre os modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água. Este trabalho trata da elaboração de uma rotina de pré-processamento, baseada em ferramentas de geoprocessamento em ambiente SIG e em um algoritmo em MATLAB, que visa a representação das características morfométricas do lago de maneira compatível com o modelo numérico, reduzindo o esforço por parte modelista e facilitando a aplicação futura do modelo a outros reservatórios.

Palavras-chave: Modelos 2D verticais. Pré-processamento. Geoprocessamento.

Abstract

Nowadays, Brazilian's northeast region has reached a new contest where de efforts for water offering maximization from quantitative point of view, by means of damming policies, passes to lose viability unless qualitative warranties are given. This way, it becomes necessary to develop regular monitoring campaigns with capacity to give support to the numerical simulation process of such water bodies. Considering the available alternatives, we can quote CE-QUAL-W2, a vertical-longitudinal two dimension model offered by the United States Army Corps of Engineers (USACE), as the state of the art among hydrodynamics and water quality models. This paper brings up a pre-processing routine, developed based on geoprocessing tools in GIS environment and a MATLAB algorithm, which aims to represent lake's morphometric characteristics in a consistent way with a numerical model. this procedure reduces the modeler's effort, making further model's application in other reservoirs easier.

Keywords: Vertical 2d models. Pre-processing. Geoprocessing.

1 Introdução

Desde meados do século XIX, a alta densidade populacional da região semi-árida do Nordeste Brasileiro associada a ocorrência de eventos críticos de estiagem começou a demandar soluções para o problema das secas que transcenderam o âmbito privado da propriedade rural para se tornarem políticas públicas.

Assim, a mais populosa região semi-árida do mundo passou a ser palco de uma das maiores iniciativas de construção de reservatórios dedicados a suprir água para consumo humano e para desenvolvimento de atividades econômicas durante períodos de estiagens que, não excepcionalmente, superam a escala anual.

É lugar comum se referir à promessa de Dom Pedro II, no contexto da seca de 1877 (um dos eventos do ENOS mais fortes sofridos pela região nos últimos 200 anos), de “empenhar as jóias da coroa se fosse necessário” para debelar o “drama das secas” do “Norte Grande” como era denominada a região à época (MOLLE, 1991). A rigor, a conclusão do Açude Cedro em Quixadá, iniciado por Dom Pedro II, ainda com trabalho escravo, aconteceu quando a Monarquia já nem sequer existia.

Mesmo assim, com muitas polêmicas, exacerbados detratores e entusiastas defensores, a “política de açudagem” deixou, ao longo de mais de 100 anos, uma importante capacidade de armazenamento em reservatórios, cujas dimensões muitas vezes superam a vazão média anual afluente.

Concebidos para suportar secas interanuais, estes reservatórios, pouco objetáveis da perspectiva quantitativa são praticamente desconhecidos em relação a seus aspectos qualitativos.

Com exceção de um seletivo conjunto de reservatórios, na maioria dos açudes do Nordeste as características qualitativas de suas águas não são monitoradas regularmente e sua evolução temporal é praticamente desconhecida.

Esta questão só vem à tona durante as grandes estiagens e quando a qualidade das águas impede o consumo ou prejudica a saúde dos usuários.

Emblemático é o caso do uso de água proveniente do Açude Tabocas (Bacia do rio Ipojuca no Agreste Pernambucano) quando se encontrava praticamente seco e num processo de floração de cianobactérias.

As águas provenientes deste reservatório, contaminadas com toxinas liberadas pelas algas, foram incorporadas à rede de distribuição de água potável de Caruaru e utilizadas para limpeza de equipamentos de Hemodiálise; provocando assim, um dos maiores acidentes com conseqüências fatais decorrentes do consumo de águas impróprias ao longo de toda a história do Nordeste (57 mortos).

O estudo da qualidade das águas dos reservatórios esbarra em várias restrições. Por um lado, as campanhas de monitoramento da qualidade são bem mais custosas e complexas do que o monitoramento hidrológico dos reservatórios. Somado a isso, dispor de informações de qualidade que possam permitir inferir padrões de comportamento exige que se disponha também de um importante conjunto de variáveis meteorológicas e hidrodinâmicas, até pouco tempo indisponíveis.

Com a diminuição dos preços das sondas e eletrodos seletivos, associados à implantação de plataformas de coleta contínua de dados meteorológicos e a disponibilidade de sondas de efeito Doppler para medição de perfis de velocidades, pode-se dizer que, mesmo com notadas restrições, a região atingiu um estágio tecnológico que permite abordar este problema de forma satisfatória. O baixo custo dos processadores de alto rendimento e a disseminação de softwares livres dedicados à simulação de variáveis de qualidade da água em ambientes multidimensionais também contribuíram sensivelmente para a abordagem destes estudos.

A divulgação destes dados permite que se ponha em prática o processo de modelagem numérica bidimensional vertical longitudinal por meio do software CE-QUAL-W2, disponibilizado gratuitamente pelo United States Army Corps of Engineers (USACE), conhecido como o “estado da arte” entre os modelos hidrodinâmicos e de qualidade da água.

Para o caso específico deste artigo foram empregados os dados do Reservatório Pereira de Miranda, disponibilizados por meio do Convênio UFC-COGERH, como parte das pesquisas do “Grupo de Gerenciamento do Risco Climático em Recursos Hídricos” da Universidade Federal do Ceará.

No entanto, apesar deste modelo possuir mais de setecentas aplicações bem sucedidas no seu país de origem e muitas outras ao redor do mundo, no Brasil ele não é tão divulgado, senão pelos trabalhos desenvolvidos pelos IPH da UFRGS e PHD da USP (PAIVA, 1999; DE LUCA & PRATES, 2000a e 2000b; JESUS *et al.*, 2006) . No Nordeste, os estudos de capacidade de suporte do estuário do Rio Potengi no Estado do Rio Grande do Norte (CAERN, 2006) talvez sejam as únicas aplicações já realizadas.

Além da disponibilidade de dados adequados, um dos maiores entraves para aplicação do modelo pode ser representado pela advertência proferida pelos seus próprios criadores (COLE & WELLS, 2005) de que a sua aplicação consiste em uma tarefa complexa que demanda muito tempo e dedicação.

Neste sentido, este trabalho pretende propor uma nova metodologia que automatize as principais etapas de pré-processamento, reduzindo significativamente o tempo necessário para aplicação do modelo a objetos de estudo futuros. Esta metodologia consiste na elaboração de uma rotina de pré-processamento automatizada, baseada em ferramentas de geoprocessamento em ambiente SIG e em um algoritmo em MATLAB, que facilite a aplicação futura do modelo a outros reservatórios.

2 Estado da Arte

2.1 Modelos de Qualidade da Água

Os modelos aplicáveis a lagos e reservatórios envolvem dois componentes importantes: (i) um balanço hídrico ou equação de continuidade que descreve a quantidade de água presente em um determinado momento, e (ii) uma série de balanços de massa, ou equações advectivas-dispersivas, que descrevem a variação da quantidade de um determinado contaminante ou constituinte da qualidade da água presente no meio e a maneira como a sua massa é transportada e transformada; sendo resolvida uma equação de balanço de massa para cada constituinte de interesse (Martin e McCutcheon, 1998).

Rajar *et al* (1997) afirmam que os modelos de qualidade da água se caracterizam por ser sistemas de simulação integrados, compostos basicamente por dois módulos ou sub-modelos: (i) módulo hidráulico, o qual determina os campos de velocidades e as relações entre as variáveis batimétricas do reservatório, e (ii) módulo de transporte de massa, o qual simula o transporte, dispersão e os processos cinéticos dos constituintes dissolvidos no corpo d'água.

Segundo Orlob *et al.* (1983) não existem modelos universais suficientemente detalhados para descrever completamente o comportamento físico e bioquímico de lagos. Simplificações devem ser introduzidas em ordem a formular modelos e tornar possíveis suas soluções. O grau de simplificação, incluindo promediação ou o descarte de termos de ordens superiores, reduz necessariamente a abrangência do modelo.

Os balanços hídricos e de massa podem ser solucionados de diversas maneiras, suas soluções podem ser dinâmicas ou simplesmente representar um estado estacionário. Do ponto de vista espacial, os modelos de lagos e reservatórios podem ser divididos em seis categorias: (i) zero-dimensionais, onde o lago é modelado como um todo, (ii) unidimensionais de camadas verticais, (iii) unidimensionais na direção longitudinal, (iv) bidimensionais lateralmente promediados, (v) bidimensionais verticalmente promediados e (vi) completamente tridimensionais.

Os modelos zero-dimensionais são incapazes de fornecer quaisquer informações referentes a fenômenos espacialmente dependentes, como a estratificação térmica e a distribuição de oxigênio dissolvido em um corpo de água.

Modelos unidimensionais de camadas verticais têm sido amplamente aplicados a grandes e profundos reservatórios, no entanto desprezam os gradientes longitudinais, muitas vezes importantes para a representação dos processos físicos e bioquímicos. Este modelo costuma adaptar-se melhor quanto mais lânticas forem as condições observadas no ponto modelado, uma vez que os processos hidrodinâmicos horizontais são computados externamente ao modelo.

Por considerar todas as variáveis homogêneas para cada seção, os modelos unidimensionais longitudinais se aplicam a lagos e reservatórios com formas extremamente alongadas, com pequenas profundidades e largas; como é o caso das barragens de nível em vales estreitos.

Para Orlob *et al* (1983), se as dimensões laterais de um corpo de água são suficientemente pequenas quando comparadas à suas dimensões longitudinais, o sistema pode ser considerado por aproximação como bidimensional no plano vertical-longitudinal. Esta é a simplificação da realidade que caracteriza os modelos bidimensionais lateralmente promediados a exemplo do CE-QUAL-W2 v3.6 (Cole & Wells, 2008).

Modelos tridimensionais são aplicados em situações particulares, as quais, a representação dos gradientes nas três direções principais são importantes (MAKINIA *et al*, 1998).

2.2 O fenômeno da estratificação térmica

A estratificação térmica se constitui no principal fator que induz a utilização de modelos numéricos que abordem a dimensão vertical. A relevância deste processo está em sua forte influência sobre o comportamento hidrodinâmico e das variáveis de qualidade da água presentes em reservatórios.

Segundo Tundisi (1986), as represas são sistemas artificiais complexos, intermediários entre rios e lagos, cuja evolução depende de vários processos que ocorrem no tempo e no espaço. O conhecimento destes processos permite avaliar a evolução das comunidades planctônicas, bentônicas e de peixes, bem como a composição físico-química da água e do sedimento.

Os lagos são ambientes límnicos (limnos = lago) com regime lântico. Eles apresentam origem variada, dependendo da situação geomorfológica da região. Esteves (1988) classifica as represas ou reservatórios como um ambiente de transição entre ambiente lótico e lântico, ou seja, de águas correntes para águas paradas, pois dependem das condições

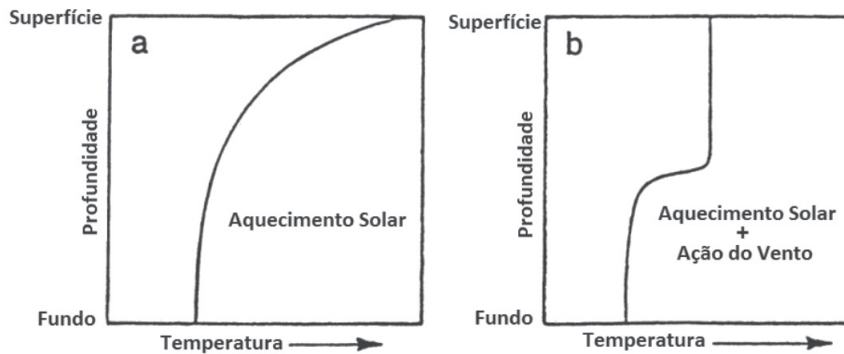
hidrológicas, geológicas e hidráulicas do rio, para a sua construção. Muitos lagos apresentam uma termoclina estável durante o ano, enquanto que as represas podem apresentar estratificação térmica completamente instável, dependendo do seu uso e das características climáticas do local.

Segundo Thomann e Mueller (1987) do ponto de vista da engenharia de qualidade da água, a temperatura de um corpo de água é de particular significância por três razões principais: (i) as descargas de excesso de calor por meio de efluentes industriais ou municipais podem afetar positiva ou negativamente o ecossistema aquático, (ii) a temperatura influencia todas as reações químicas e biológicas e (iii) variações de temperatura afetam a densidade da água e conseqüentemente os fenômenos de transporte.

A qualidade da água é profundamente afetada pela tendência, existente na maioria dos médios e grandes reservatórios, de que suas massas de água não apresentem mistura completa na dimensão vertical durante significativas parcelas do ano. Este fenômeno é conhecido como estratificação térmica.

Quando tratamos de água doce, podemos afirmar que a estratificação ocorre quando os efeitos do aquecimento pelo sol superam os efeitos das misturas pelo vento, ou seja, quando as forças de flutuação, devidas à redução de densidade pelo aquecimento, superam as forças geradoras de turbulência.

Na Figura 2.1a podemos observar o efeito do aquecimento pela radiação solar acontecendo isoladamente, enquanto que na Figura 2.1b observamos o efeito da ação do vento sobre o mesmo sistema. Observa-se uma zona próxima à superfície com distribuição de temperaturas homogênea seguida de uma pequena zona de gradientes térmicos mais intensos.



Figuras 1a e 1b: Efeitos da radiação solar e do vento sobre os gradientes verticais de temperatura (Adaptado de Cole, 1994).

Quando um corpo de água apresenta estratificação térmica podem identificar-se três regiões diferenciadas. A saber: epilimnio, metalimnio e hipolimnio (Figura 2.2).

O epilimnio é a região superficial do reservatório onde existe grande turbulência e os processos de mistura e troca de energia e massa com a atmosfera são preponderantes (MOLINAS, 1991).

O metalimnio é uma região de transição onde se equilibram as ações do vento, a radiação solar e o empuxo da massa de água. Martin e McCutcheon (1998) sugerem a delimitação desta região como sendo aquela em que se observam gradientes térmicos verticais da ordem de 1°C/m ou superiores. A localização do metalimnio depende da transparência da água, da morfologia, da localização geográfica do lago, da exposição ao vento e outras variáveis (SCHÄFER, 1985).

O hipolimnio é a região do reservatório onde as trocas de gases e energia com a superfície são desprezíveis. Esta camada possui baixas temperaturas e gradientes térmicos.

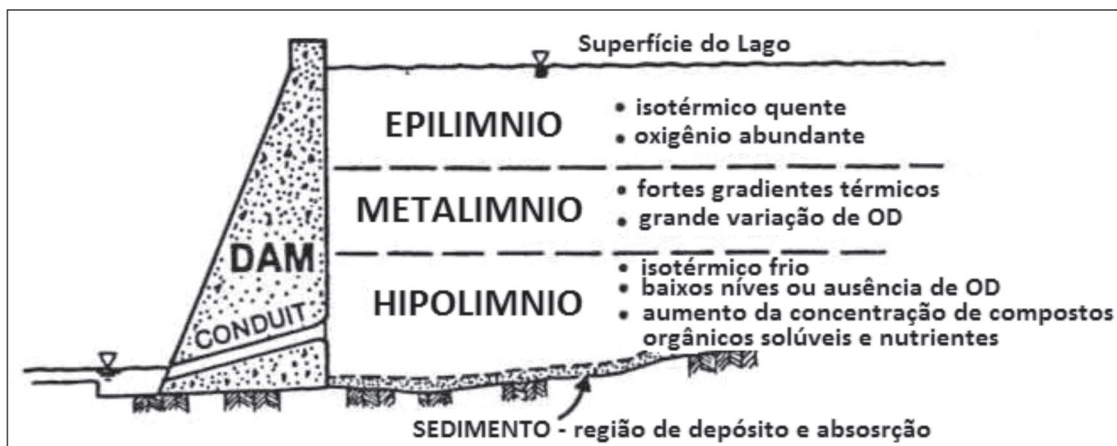


Figura 2: Perfil típico de estratificação térmica em reservatórios (Adaptado de Martin e McCutcheon, 1998).

A necessidade de abordar as variações verticais devidas ao fenômeno da estratificação térmica consiste na principal razão pela qual se faz necessário o emprego de modelos numéricos multidimensionais. Neste contexto, os modelos bidimensionais verticais ou lateralmente promediados representam a alternativa mais simples e efetiva para a simulação do comportamento da grande maioria dos médios e grandes reservatórios da Região Nordeste do Brasil.

2.3 Modelos bidimensionais lateralmente promediados

Martin e McCutcheon (1998) afirmam que este tipo de modelo é geralmente aplicável a reservatórios mais longos, fundos e estratificados onde a variabilidade lateral é desprezível. Existem dois tipos de modelos lateralmente promediados: (i) os de aproximação por modelagem de “caixa” ou box modelling e (ii) os de solução completa das equações de hidrodinâmica e qualidade da água combinadas.

O conceito de *box modelling* foi desenvolvido e revisado por Thomann (1972), Chen e Smith (1979), Shanahan e Harleman (1984) e Chapra (1997). Estes modelos resolvem a equação de transporte para cada “caixa” considerando que os fluxos advectivos e as trocas devidas a mistura ocorrem ao longo de cada interface entre “caixas” contíguas. As trocas de massa com a atmosfera e o sedimento são incluídas no equacionamento das “caixas” periféricas. Os modelos de “caixa” mais frequentemente empregados são o WASP5 proposto por Ambrose *et al* (1993) e o BETTER criado por Brown (1985) e revisado por Bender *et al* (1990).

O segundo tipo de modelo é baseado na solução por meio de diferenças finitas das equações hidrodinâmicas combinadas direta ou indiretamente aos algoritmos de qualidade da água. As equações levadas em conta no módulo hidrodinâmico são as de conservação de momento, continuidade e conservação de massa.

Quando empregada a combinação direta as equações de transporte são solucionadas simultaneamente às equações hidrodinâmicas, sendo frequentemente usadas as mesmas grades computacionais e incrementos de tempo para ambas.

Na combinação indireta, os resultados da simulação hidrodinâmica são armazenados e posteriormente utilizados independentemente na simulação de qualidade da água. Isto permite o emprego de dados de entrada para a qualidade com frequência inferior a dos dados referentes aos processos hidrodinâmicos, reduzindo significativamente o esforço computacional demandado pelo modelo.

Pertencente a este último grupo, o modelo matemático bidimensional CE-QUAL-W2 é conhecido como o “estado da arte” entre os modelos de qualidade da água e hidrodinâmicos em reservatórios; também sendo aplicado a diferentes sistemas entre rios, estuários, lagos e suas combinações, por todo o mundo (SOUZA, 2006).

3 Metodologia

A metodologia deste artigo é dividida em três partes: A primeira consiste na análise da estrutura do modelo CE-QUAL-W2, onde é descrita a seqüência de procedimentos de modelagem necessários para a sua aplicação; a segunda aborda os dados necessários para a utilização do modelo; enquanto que a terceira descreve a rotina de pré-processamento desenvolvida para, partindo de um levantamento topobatimétrico, chegar ao esboço definitivo que representará a geometria do lago.

3.1 Análise da Estrutura do Modelo CE-QUAL-W2

O processo de modelagem por meio do CE-QUAL-W2 pode ser separado em três etapas: pré-processamento, simulação e pós-processamento.

3.1.1 Pré-processamento

Na etapa de Pré-processamento são realizadas: (i) definição do objeto de estudo e do escopo de modelagem utilizado para a sua abordagem; (ii) coleta e organização dos dados de entrada necessários, (iii) análise dos dados obtidos e verificação de sua consistência; (iv) definição das condições de contorno; (v) adequação do formato dos dados aos requisitos do modelo e preparação dos arquivos de entrada em seus formatos específicos; (vi) execução do arquivo executável “preW2_ivf.exe”; (vii) verificação da existência de erros e advertências; (viii) obtenção dos arquivos de saída de pré-processamento (“pre.opt”).

É importante frisar que estas etapas não se sucedem linearmente e que o avanço para a etapa seguinte depende de certas condições, dando origem a processos cíclicos conforme vemos no fluxograma da Figura 3.

3.1.2 Simulação

A etapa de simulação é diretamente dependente do sucesso obtido durante a etapa de pré-processamento, sendo os arquivos gerados na última, necessários para a execução do algoritmo principal do Modelo.

Existem três formatos diferentes para o arquivo executável do CE-QUAL-W2: (i) “w2_ivf.exe”, que consiste na versão tradicional do programa compatível com sistemas operacionais de 32 bits; (ii) “w2_ivf64.exe”, idêntico a (i), porém compatível com sistemas operacionais de 64 bits; e (iii) “w2_ivf_MATFOR.exe” similar aos demais, no entanto, dotado de uma interface gráfica que exhibe os resultados calculados para cada intervalo de tempo de modelagem.

Além dos arquivos executáveis, os autores também disponibilizam os códigos fonte sob a forma de diversas sub-rotinas independentes. Estas podem ser editadas caso o usuário opte por alterar alguma das formulações definidas que não possam ser modificadas por meio dos arquivos de entrada.

Caso surjam erros durante o processo de simulação, é gerada uma advertência (“w2.err”) onde são mostradas as iterações realizadas até o acontecimento do erro e as possíveis razões pelas quais o mesmo ocorreu. Uma vez constatado o erro, deve-se retornar a etapa (iv) de definição das condições de contorno do pré-processamento; repetindo o processo até que não sejam identificados mais erros.

Uma vez executado com sucesso, o programa fornece o arquivo de saída “snp.opt” com os resultados da primeira simulação. Dá-se então, início à calibração do Modelo, onde os resultados simulados são comparados aos dados reais observados. Caso esta comparação não seja satisfatória, retorna-se a etapa (iv) de definição das condições de contorno do pré-processamento; repetindo o processo até que a semelhança entre dados gerados e observados seja a melhor possível (Figura 4).

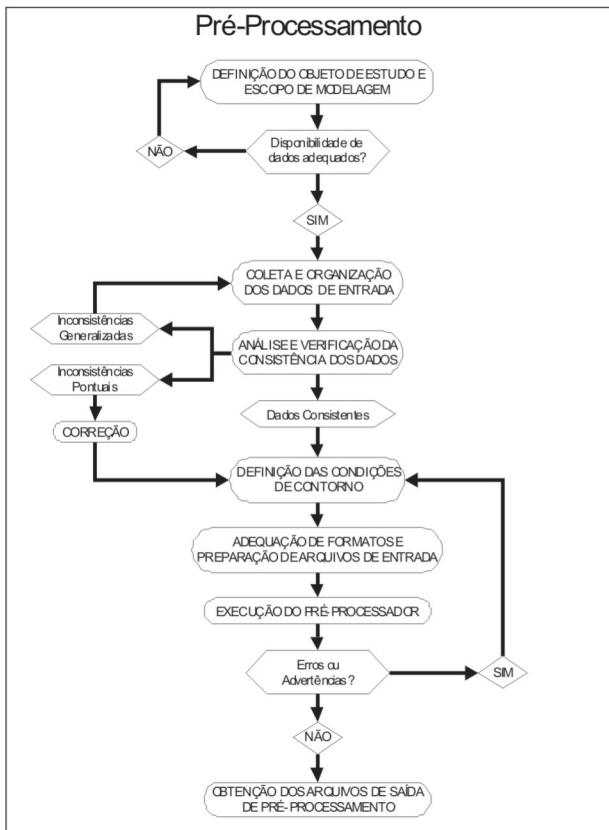


Figura 3: Fluxograma da etapa de Pré-processamento.

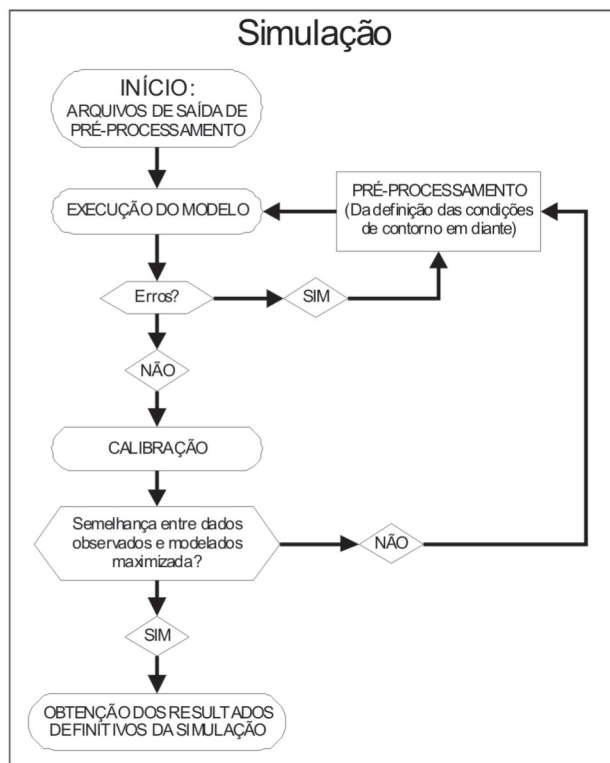


Figura 4: Fluxograma da etapa de Simulação.

3.1.3 Pós-processamento

Etapa final do processo de modelagem onde são: (i) analisados os resultados definitivos, gerando gráficos e tabelas que facilitem a sua compreensão; (ii) confirmadas ou refutadas as hipóteses formuladas antes do início do processo de modelagem; (iii) geradas novas hipóteses sobre as causas relativas aos resultados observados; e (iv) geradas conclusões e eventuais tomadas de decisão a respeito do objeto de estudo.

3.2 Rotina de Pré-processamento

3.2.1 Batimetria

Toda a determinação das características geométricas adotadas como condições de contorno da modelagem do lago formado pela Barragem Pereira de Miranda tiveram como base o levantamento topobatimétrico realizado pela COGERH em Outubro de 2009. Fazendo uso de um ecobatímetro incorporado a borda de um barco foram levantados 94.675 pontos com informações de coordenadas e profundidades, representando uma densidade, em relação à área da bacia hidráulica, de aproximadamente 19 pontos por hectare.

Durante o levantamento, o nível do Reservatório se encontrava na cota 57,25 msnm; de maneira que, o gráfico de cota-área-volume (Figura 5) determinado com o estudo teve de ser extrapolado para atingir a cota da soleira do sangradouro. Os resultados indicam uma bacia hidráulica com área de 5.040 ha, perímetro de 126,9 km e profundidade máxima de 19,8 m.

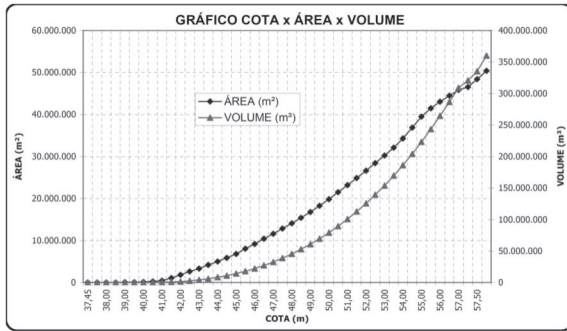


Figura 5: Gráfico de cota-área-volume do Açude Pentecoste (COGERH, 2009).

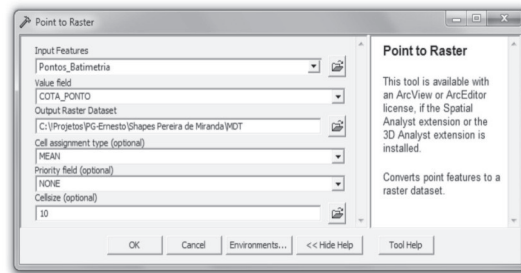


Figura 6: Janela de comando da função “Point to Raster” do ArcGIS 9.3.

3.2.2 Modelo Digital do Terreno

Os modelos em perspectiva são conhecidos como Modelos Digitais do Terreno (“Digital Terrain Model” ou DTM), ou Modelos Digitais da Superfície (“Digital Ground Model”, DGM). O termo Modelo Digital do Terreno é o mais utilizado. Segundo Doyle (1978), ele parece ter origem num trabalho de Charles L. Miller e colaboradores; no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, entre 1955 a 1960. O autor os define os MTD como arranjos ordenados de números, que reproduzem a distribuição espacial das características do terreno.

As informações do levantamento topobatimétrico também foram disponibilizadas em formato de arquivo de Sistema de Informações Geográficas (shape file), onde os atributos espaciais (pontos) são associados a uma base de dados georreferenciada. Este arquivo serviu como base para a elaboração do MDT do lago da Barragem Pereira de Miranda, por meio do software ArcGIS 9.3 (ESRI, 2008).

A geração do MDT foi realizada através da função “Point to Raster” do toolbox (“caixa de ferramentas”) do ArcGIS 9.3 (Figura 6). Esta função define uma malha quadriculada sobre o conjunto de pontos, onde cada célula da malha recebe um valor equivalente a média das cotas dos pontos que se localizam sobre ela (Figura 7). As células que não possuem pontos superpostos recebem valores interpolados por meio de um processo de krigeagem universal linear (ESRI, 2008). Foram adotadas células quadradas com lados de dez metros.

3.2.3 Eixos de Projeto

Os eixos de projeto foram definidos com base no que seriam os cursos d’água principais da rede de drenagem obtida a partir do MDT do Lago, ou seja, os leitos inundados do Rio Canindé e do Riacho Minguá.

Para isso foi necessário o cumprimento de seis etapas baseadas no acervo de funções disponíveis no pacote hidrologia da extensão “Spatial Analyst” do ArcGIS 9.3: (i) definição da direção de drenagem de cada célula do MDT (Raster de Direções), com auxílio da função “Flow Direction”; (ii) cálculo do número de células a montante drenadas por cada célula do MDT (Raster de Acumulações), com a função “Flow Accumulation”; (iii) aplicação de um operador booleano ao Raster de Acumulações para a determinação das células pertencentes à rede de drenagem (Raster de Rede), por meio da função “Con”; (iv) transformação das células do Raster de Rede em entidades vetoriais (polilíneas), utilizando a função “Stream to Feature”; (v) seleção e isolamento da polilíneas pertencentes à rede de drenagem principal, realizadas manualmente; e (vi) aplicação de uma função de suavização (“Smooth Line”) para eliminar os “bicos” residuais da transformação de elementos raster em elementos vetoriais.

A última etapa pode ser realizada através de dois métodos: o PAEK (Pynomial Aproximation with Exponential Kernel) e a Interpolação de Bezier. O primeiro prioriza o “corpo” dos segmentos que compõem as polilíneas, enquanto que, o segundo prioriza os vértices das polilíneas (Figura 8). Para o caso dos eixos de projeto, o método PAEK apresentou melhores resultados.

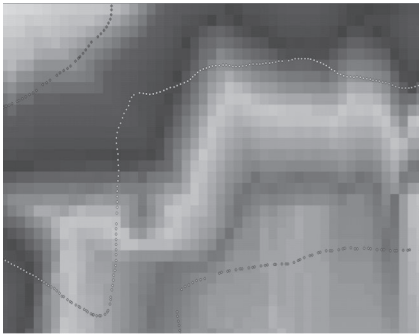


Figura 7: Exemplo de pontos coletados em batimetria convertidos em MDT.

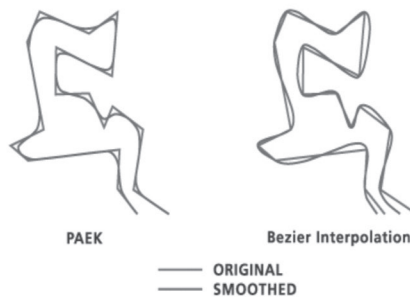


Figura 8: Comparação entre os métodos PAEK e Interpolação de Belzier (ESRI, 2008).

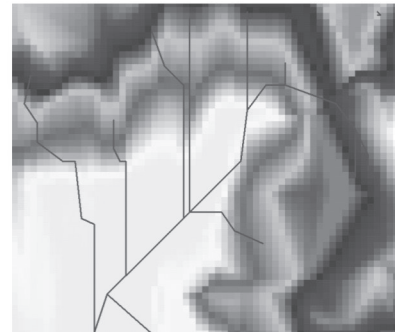


Figura 9: Exemplo de rede de drenagem extraída de MDT.

3.2.4 Definição das Seções

A definição das seções de projeto consideradas na aplicação do Modelo CE-QUAL-W2 ao Reservatório Pereira de Miranda pode ser separada em duas etapas: Uma desenvolvida dentro de ambiente SIG utilizando as ferramentas de análise espacial disponíveis no pacote de extensão “ET Geo Wizards” (TCHOUKANSKI, 2009) do ArcGIS 9.3 e outra realizada através de um algoritmo em MATLAB R2009d (MATHWORKS, 2009) desenvolvido especificamente para este trabalho.

A etapa realizada em ambiente SIG tem por objetivo a determinação da geometria das seções de projeto no formato de coordenadas cartesianas “YxZ” (estaqueamento da seção versus cota); enquanto que, o algoritmo desenvolvido tem por objetivo a transformação dos dados obtidos na primeira etapa em um formato compatível com o CE-QUAL-W2, expressando a geometria das seções em: espessuras, cotas e larguras de cada uma de suas camadas.

Primeira Etapa: Ambiente SIG

Uma vez definidos os eixos de projeto, optou-se por traçar os alinhamentos das seções com 3 km de comprimento, perpendicularmente aos eixos, espaçados a cada 500 m. Isto foi feito por meio da ferramenta “Create Station Lines” seguindo os passos exibidos nas Figuras 10, 11 e 12.

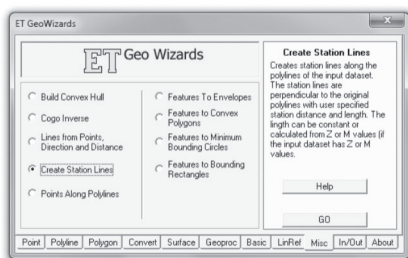


Figura 10: Janela de escolha da função “Create Station Lines”.

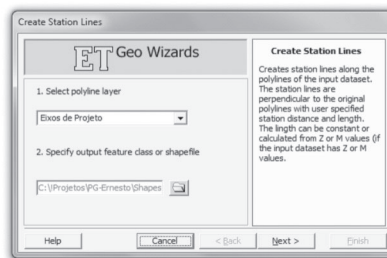


Figura 11: Janela de escolha do “shape file” representativo dos eixos de projeto.

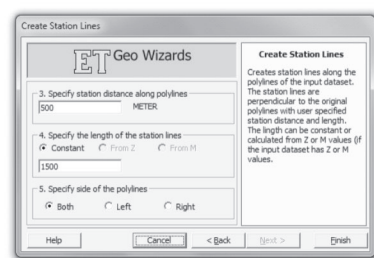


Figura 12: Janela de escolha do espaçamento entre seções e do comprimento das mesmas.

O próximo passo consiste em estaquear estes alinhamentos, definindo pontos a cada 30 metros que servirão futuramente para capturar informações do MDT e associá-las a cada seção de projeto. Para isto fez-se uso da função “Create Station Points” seguindo os passos exibidos nas Figuras 13, 14 e 15.

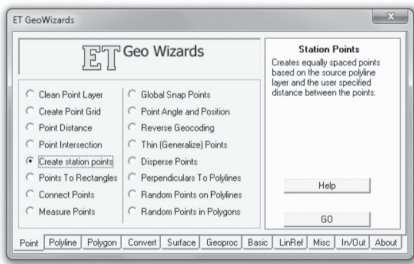


Figura 13: Janela de escolha da função “Create Station Points”.

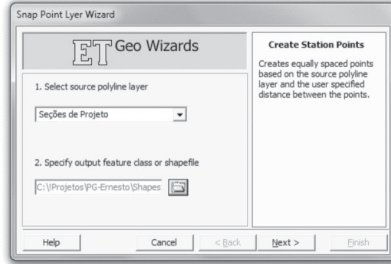


Figura 14: Janela de escolha do “shape file” representativo dos alinhamentos das seções.

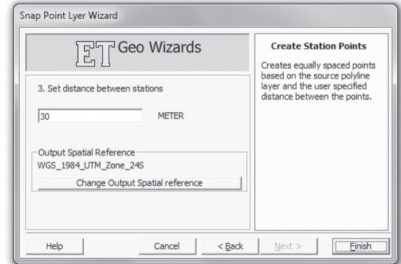


Figura 15: Janela de escolha do espaçamento entre os pontos de estaqueamento.

Uma vez definidos os alinhamentos (polilíneas) e estaqueamentos (pontos) das seções, chega o momento de capturar as informações de cota presentes no MDT e associá-las a base de dados georreferenciados dos pontos que compõem o estaqueamento (Figura 16). Isto se dá fazendo uso da função “Extract Values to Points” da extensão Spatial Analyst do ArcGIS 9.3.

Em azul, vemos a representação do alinhamento da seção; em preto, os pontos que receberão as informações do MDT; e ao fundo, em escala de cores, o MDT contendo as informações provenientes da batimetria.

Na Figura 17, podemos observar um exemplo de base de dados georreferenciados de um arquivo de estaqueamento de seções de projeto, após a realização do cruzamento de informações entre pontos e MDT.

As linhas representam as informações armazenadas para cada ponto, exceto pela primeira, que indica os nomes das variáveis, onde: “ET_ANGLE” se refere ao azimute da seção a que pertencem os pontos; “ET_ID” indica o nome da seção; “ET_X” e “ET_Y”, as coordenadas em UTM; e “RASTERVALU” representa as cotas extraídas do MDT.

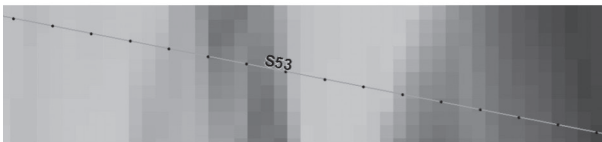


Figura 16: Exemplo de alinhamento e estaqueamento de uma seção de projeto posicionada sobre o MDT de onde se pretende extrair as informações de cota.

FID	Shape *	ET_ANGLE	ET_STATION	ET_ID	ET_X	ET_Y	RASTERVALU
537	Point	92.2239	1020	5	475886.46619	9570125.72189	55.638683
538	Point	92.2275	1050	5	475916.44353	9570124.55614	54.638805
539	Point	92.2275	1080	5	475946.42087	9570123.39039	54.369987
540	Point	92.2239	1110	5	475976.39821	9570122.22465	53.925993
541	Point	92.2275	1140	5	476006.37556	9570121.0589	54.879658
542	Point	92.2275	1170	5	476036.3529	9570119.89315	53.736195
543	Point	92.2239	1200	5	476066.33024	9570118.7274	53.183048

Figura 17: Exemplo de base de dados georreferenciados do estaqueamento das seções.

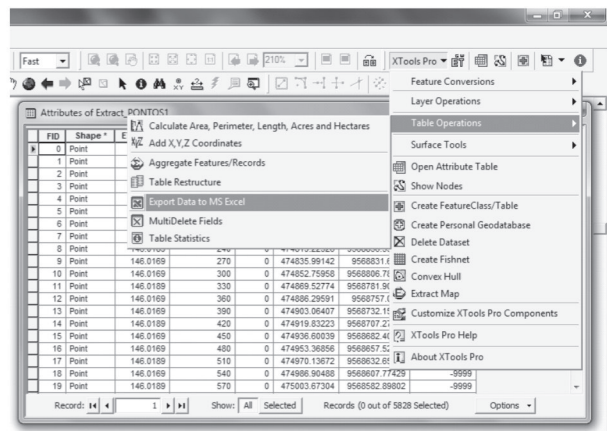


Figura 18: Exportação de dados do ArcGIS 9.3 para o MS Excel.

Por último, a etapa de determinação das seções de projeto em ambiente SIG é finalizada com a exportação dos dados do ArcMAP 9.3 para o formato de planilha MS EXCEL, utilizando a função “Export Data do MS Excel” (Figura 18).

Segunda Etapa: MATLAB.

Como comentado anteriormente, os dados de entrada de geometria do CE-QUAL-W2 não são formados pelo “desenho” das seções em coordenadas cartesianas; e sim pelas espessuras, larguras e cotas de cada uma das camadas que compõem a seção. Deste modo, faz-se necessária a conversão do formado dos arquivos obtidos na primeira parte da determinação das seções de projeto.

Em um primeiro momento, foi formulada uma metodologia na qual, o conjunto de pontos que formam uma seção é representado por um gráfico de dispersão de estaqueamento (horizontal) versus cota (vertical); a esta dispersão seria associada uma linha de tendência polinomial ajustada pelo Método dos Erros Mínimos Quadrados. Finalmente, para encontrar as larguras de cada camada, se resolveria a equação do polinômio fazendo variar a constante de grau zero, de acordo com a cota da camada desejada.

Nas Figuras 19 e 20 observam-se (em azul) a forma real de uma seção de projeto e (em preto) as linhas de tendência polinomiais do segundo e sexto grau, respectivamente.

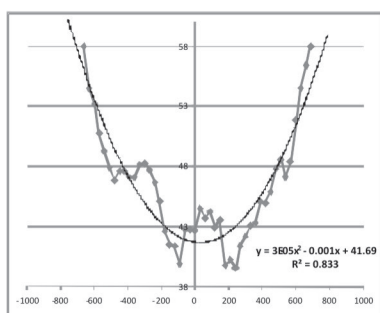


Figura 19: Representação de uma seção de projeto por linha de tendência polinomial do segundo grau, sua equação e valor de R-quadrado.

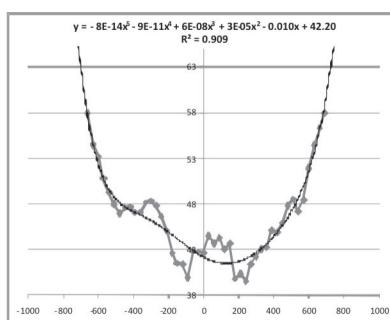


Figura 20: Representação de uma seção de projeto por linha de tendência polinomial do sexto grau, sua equação e valor de R-quadrado.

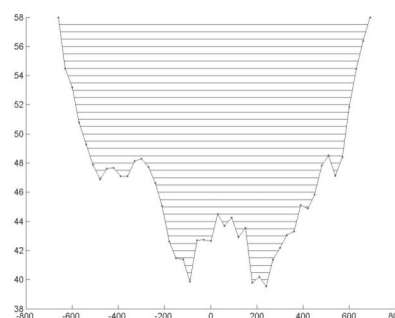


Figura 21: Representação de uma seção de projeto por linhas horizontais.

Observando a representação polinomial de segundo grau percebemos uma adaptação insatisfatória da linha de tendência aos dados, representada por um R2 de apenas 83%. Quando passamos a usar um polinômio do sexto grau, nota-se uma sensível melhora (R2=91%). Por outro lado, observa-se que a representação polinomial reduz a profundidade da seção; ao perceber que este erro se repetia sistematicamente para diversas seções do reservatório, optou-se por descartar o uso do método.

Como forma de corrigir os erros da primeira metodologia, foi desenvolvido um novo processo, mais voltado às questões de representação gráfica.

No novo método são determinados dois grupos de retas. No primeiro, são traçadas retas entre todos os pontos adjacentes, sendo as equações destas, armazenadas em um vetor. No segundo, é traçado outro conjunto de retas horizontais representando o eixo de cada uma das camadas que formam a seção (Figura 21).

Uma vez desenhado o esquema de representação da seção e das camadas que a compõem, determinam-se os pontos de interseção entre as retas pertencentes aos dois grupos citados.

Desta forma, as larguras das camadas que compõem a seção são determinadas pela soma dos módulos da diferença entre os estaqueamentos de cada um dos pares de pontos que determinam as retas horizontais representadas na Figura 21.

Para o Reservatório Pereira de Miranda adotaram-se camadas de 50 cm, sendo assim, os resultados do algoritmo foram armazenados em uma matriz de 42 linhas (Camadas) por 58 colunas (segmentos não nulos).

3.2.5 Preparação dos Arquivos

O arquivo de entrada com a geometria das seções (“bth.npt”) é similar ao de meteorologia descrito no Tópico 5.3.3, com dez colunas de sete dígitos separadas por espaços em branco. No entanto, a disposição das informações se dá por blocos.

Nos três primeiros blocos se determinam propriedades das seções como: distância entre elas, azimute e parâmetro de fricção (Número de Manning ou Chezy). No quarto são determinadas as espessuras das camadas. Daí em diante, cada bloco se refere à geometria de uma única seção por vez (Figura 5.23).

Waterbody 1 bathymetry									
Segment lengths [DLX]									
1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00
1200.00	1200.00	1200.00	1200.00	1200.00					
Water surface elevation [WSEL]									
49.80	49.20	48.00	46.80	45.60	44.40	43.20	44.40	43.20	42.96
42.72	42.48	42.24	42.00	41.80					
Segment orientation [PHI0]									
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
Bottom friction [FRICTC]									
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04					
Layer heights [H]									
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
2.00	2.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00	1.00	1.00						
Segment 1 - branch 1									
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0						

Figura 22: Exemplo de arquivo de batimetria

A transformação do formato matricial de saída do algoritmo em MATLAB ao formato mostrado na figura 22 foi feita por meio de uma macro em Visual Basic (MICROSOFT, 2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Pré-Processamento: Ambiente SIG

No presente tópico serão apresentados os resultados obtidos durante a fase de determinação dos eixos e seções de projeto que serviu como base para a extração das informações de batimetria que compuseram o escopo geométrico de modelagem adotado para o Reservatório Pereira de Miranda.

Primeiramente (Figura 23) é exibida a distribuição espacial dos pontos que compõem a batimetria. Logo, apresenta-se o MDT representativo da bacia hidráulica (Figura 24). Então, obtêm-se as direções de drenagem que serviram como base para o traçado da rede de drenagem. Em seguida, é determinado o mapa de fluxos acumulados ao qual é aplicado o operador booleano que definirá os elementos pertencentes à rede de drenagem (Figura 25). Finalmente definem-se os eixos de projeto (Figura 26) e o escopo geométrico de modelagem do Reservatório Pereira de Miranda (Figura 27).

Figura 27: Mapa do escopo geométrico de modelagem do Reservatório Pereira de Miranda.

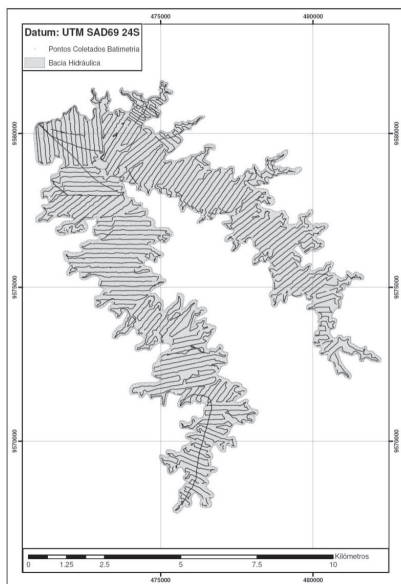


Figura 23: Mapa vetorial de distribuição espacial dos pontos coletados no levantamento topobatimétrico.

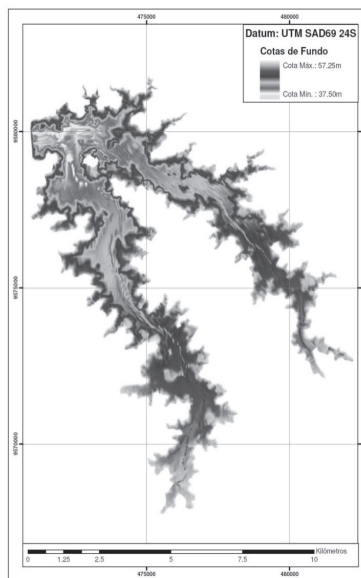


Figura 24: Mapa raster do Modelo Digital do Terreno da bacia hidrográfica.

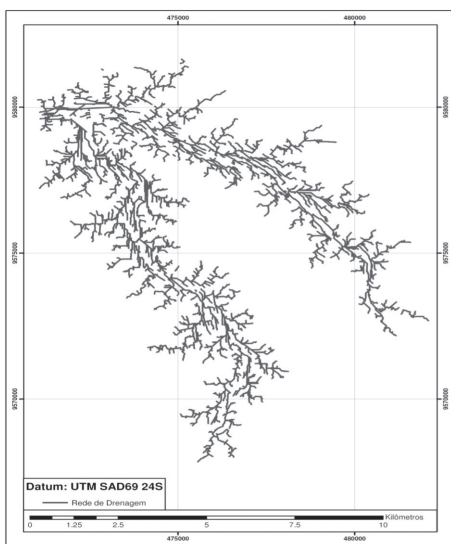


Figura 25: Mapa vetorial de rede de drenagem.

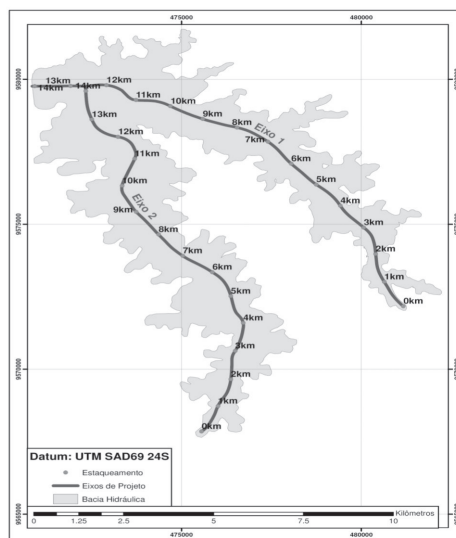


Figura 26: Mapa vetorial de eixos definitivos de projeto.

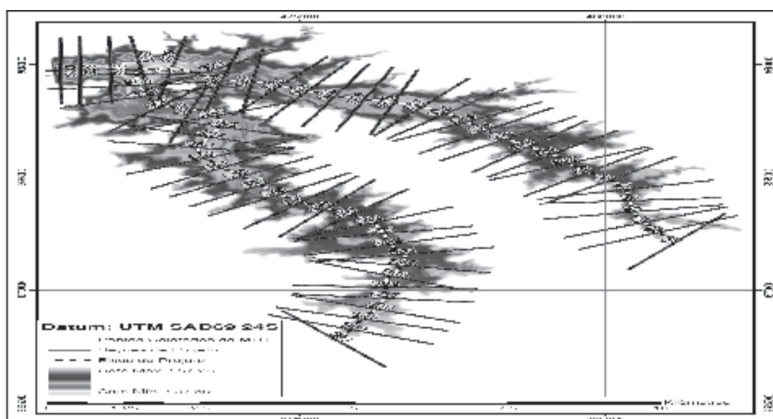


Figura 27: Mapa do escopo geométrico de modelagem do Reservatório Pereira de Miranda.

4.2 Pré-Processamento: MATLAB

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos durante a fase de coleta das seções a partir da batimetria, de acordo com o escopo geométrico definido. Também serão exibidos os resultados do processo de transformação das seções formadas por estaqueamentos e cotas em seções compatíveis com o Modelo CE-QUAL-W2, na forma de larguras e espessuras e cotas das camadas que compõem as seções (Figuras 6.26 a 6.141).

Conforme explicado no capítulo de metodologia, este processo de transformação do formato das seções se deu por meio de um programa desenvolvido em interface MATLAB de acordo com o seguinte código fonte exposto na Figura 28.

```

6/4/10 4:48 PM          C:\!Projetos\PG-Ernesto\main.m          1 of 2


---


clear all
clc
[fname,pname] = uigetfile('*.','Enter data file');
if (fname ~= 0)
    filename = sprintf('%s%s',pname,fname);
end
num = xlsread(filename);
estaca = num(:,9);
cota = num(:,10);
I = find(num(:,11)==1);
tic
a = floor(min(cota)); b = floor(max(cota));
plotflag = 1;
d = zeros;
for sec = 1:length(I)
    if sec == length(I)
        teste = [estaca(I(sec):end), cota(I(sec):end)];
    else
        teste = [estaca(I(sec):I(sec+1)-1), cota(I(sec):I(sec+1)-1)];
    end

    k = 0;
    w = 0;
    aux1 = zeros; aux2 = zeros; daux = zeros;
    for i = a:0.5:b
        w = w+1;
        k = k+1;
        k1 = 0;
        k2 = 0;
        for j = 1:size(teste,1)-1
            if i<=teste(j,2) && i>=teste(j+1,2)
                k1 = k1+1;
                aux1(k1) = j;
            end
            if i>=teste(j,2) && i<=teste(j+1,2)
                k2 = k2+1;
                aux2(k2) = j;
            end
        end
        if plotflag == 1
            hold on
            plot(teste(:,1),teste(:,2),'.-')
        end
        for j = 1:k1
            if teste(aux1(j),2) ~= teste(aux1(j)+1,2)
                p1 = interp1(teste(aux1(j):aux1(j)+1,2),teste(aux1(j):aux1(j)+1,1),
i);
            else
                p1 = max(teste(aux1(j),1),teste(aux1(j)+1,1));
            end
            if teste(aux2(j),2) ~= teste(aux2(j)+1,2)
                p2 = interp1(teste(aux2(j):aux2(j)+1,2),teste(aux2(j):aux2(j)+1,1),
i);
            else
                p2 = max(teste(aux2(j),1),teste(aux2(j)+1,1));

```

Figura 28: Algoritmo de cálculo de seções.

Os dados de saída do algoritmo desenvolvido em MATLAB, graficados nas figuras 6.26 a 6.141, ainda estão em formato de planilha Excel. A transformação do formato matricial de saída do algoritmo em MATLAB ao formato “txt” adequado aos padrões de entrada do CE-QUAL-W2 foi feita por meio de uma macro em Visual Basic (MICROSOFT, 2009).

4.3 Análise Comparativa dos Gráficos Cota-Área e Cota-Volume

Uma vez transformadas todas as seções do formato cartesiano para o formato do CE-QUAL-W2, faz-se necessária a verificação da capacidade de representação da geometria real do lago pelo modelo. Para isso optou-se por comparar os gráficos de Cota-Volume (Figura 29) e Cota-Área (Figura 30) gerados pelo levantamento topobatimétrico realizado pela COGERH e aqueles gerados como produto do pré-processador (“pré.opt”) do CE-QUAL-W2.

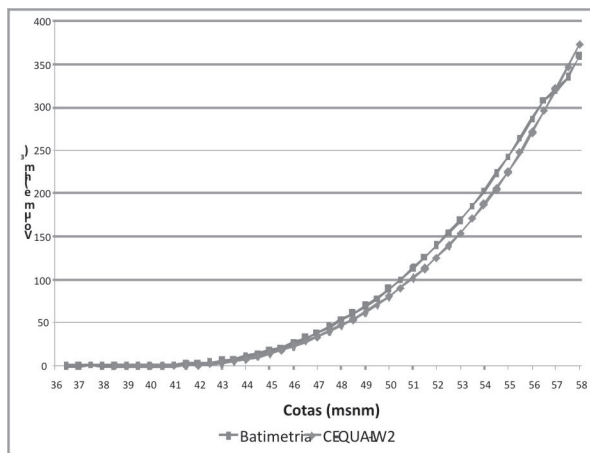


Figura 29: Gráfico comparativo de Cota-Volume.

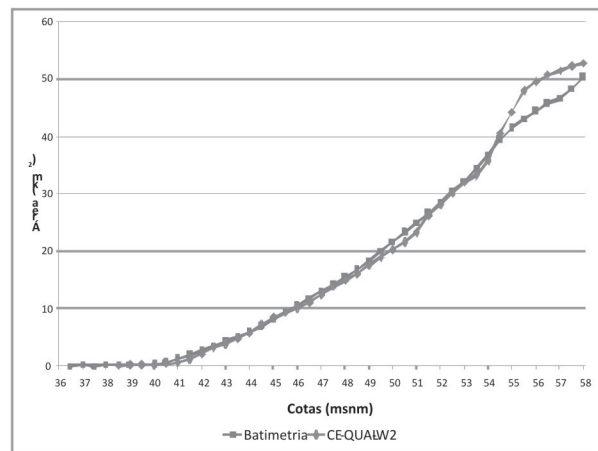


Figura 30: Gráfico comparativo de Cota-Área

Como podemos observar, o escopo geométrico de modelagem adotado apresentou bons resultados quando se considera o ponto de vista da capacidade de representação de volumes.

Pelo gráfico de Cota-Área percebemos que os valores modelados são praticamente idênticos aos da batimetria, exceto para os dados referentes às cotas acima de 55 msnm. Nestes últimos, a metodologia de transformação de seções parece superestimar os valores das áreas.

Devemos lembrar que durante o levantamento topobatimétrico, o Reservatório Pereira de Miranda de encontrava na cota 57 msnm. Desta forma, as cotas para as quais se observou discrepância entre dados modelados e observados representam regiões da bacia hidráulica próximas às margens onde a profundidade é inferior a 2 metros. Nestas Regiões, devido à dificuldade de acesso, existem menos pontos coletados.

Tendo em vista essa constatação, uma possível explicação para a aparente má representação por parte do modelo é a de que a baixa disponibilidade de dados faça com que a mudança da metodologia de interpolação gere resultados diferentes.

De qualquer maneira, não se acredita que as diferenças observadas proporcionem efeitos significativos sobre o processo de simulação da hidrodinâmica e qualidade da água do reservatório.

5 Conclusão

Os procedimentos desenvolvidos ao longo deste trabalho e a aplicação destes ao estudo do comportamento hidrodinâmico e de qualidade da água do Reservatório Pereira de Miranda foram julgados bem sucedidos segundo a metodologia fundamentada e os resultados subsequentes.

Como principais resultados, podemos citar os sucessos obtidos durante o desenvolvimento da metodologia de pré-processamento. Utilizando técnicas recentemente desenvolvidas de geoprocessamento em ambiente SIG, aliadas ao emprego de algoritmos desenvolvidos em MATLAB e Visual Basic, foi possível reduzir de maneira expressiva o tempo demandado para a determinação do escopo geométrico utilizado na modelagem dos corpos d'água; não apenas

para a aplicação do modelo CE-QUAL-W2, mas também visando outros modelos que utilizem tipo de estrutura de representação geométrica similar, como o HEC-RAS (também desenvolvido pela USACE).

Além da redução no tempo demandado, também pode ser apontada uma redução na possibilidade de cometer erros durante a organização e transformação dos dados geométricos disponíveis; pois estes, não são mais tratados manualmente, e sim, através de procedimentos automatizados, passíveis apenas a erros sistemáticos de fácil identificação.

O sucesso da aplicação desta metodologia ao escopo geométrico do Reservatório Pereira de Miranda pôde ser evidenciado quando da execução do arquivo de pré-processamento (“preW2_ivf.exe”) do CE-QUAL-W2. Nela foi possível, com alterações simples, eliminar todos os erros e advertências que poderiam indicar inconsistências ou premissas passíveis de produzir a instabilidade futura do modelo.

Outro elemento, que contribui para a confirmação do bom ajuste do escopo geométrico adotado, foi a tabela de cota-área-volume gerada pelo pré-processador interno do modelo (“pré.opt”), esta foi comparada à tabela gerada com base no levantamento topobatimétrico realizado pela COGERH, sendo obtidos bons resultados.

Referências

- AMBROSE, R. B.; WOOL, T. A.; MARTIN, J. L. *WASP5: A hydrodynamic and water quality model: model theory, user's manual and programmer's guide* (Parts I and II). Athens: U.S. Environmental Protection Agency, 1993.
- BENDER, M. D. et al. *BETTER: a two-dimensional reservoir water quality model: technical reference manual and user's guide*. Norris: Tennessee Valley Authority Engineering Laboratory, 1990.
- BROWN, R. T. *BETTER: a two-dimensional reservoir water quality model: model user's guide*, Center of the Management, Utilization and Protection of Water Resources. Cookeville: Tennessee Technological University, 1985.
- CHAPRA, S. C. *Surface water-quality modeling*. Springfield: McGraw-Hill, 1997. 841 p.
- CHEN, C. W.; SMITH, D. J. *Preliminary insights into a three-dimensional ecological-hydrodynamic model: perspectives on lake ecosystems modeling*. Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1979.
- COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUA E ESGOTO DO RIO GRANDE NO NORTE. *Estudo preliminar de avaliação da capacidade de suporte do estuário do Rio Potengi*. Natal: Acquatool Consultoria, 2006.
- DE LUCA, S. J.; PRATES, S. H. Contribuição à gestão ambiental da UHE Dona Francisca através de modelo de simulação de qualidade de água. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: ABES, 2000a. p 1-9.
- DE LUCA, S. J.; PRATES, S. H. Simulação e monitoramento de parâmetros de qualidade das águas da Barragem de Itaúba/RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDROELÉTRICAS, 2., 2000, Canela. *Anais...* Canela: Comitê Brasileiro de Barragens, 2000b.
- ESTEVES, F. A. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência, 1988.
- JESUS, J. A. O. Utilização de modelagem matemática 3D na gestão da qualidade da água em mananciais: aplicação no reservatório Billings. 2006. 142 f. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, 2006.
- MAKINIA, J. et al. *Application of mathematical modeling and computer simulation for solving water quality problems*. Portland: Portland State University, 1998.
- MARTIN, J. L.; MCCUTCHEON, S. C. *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. Washington DC: Lewis, 1998.
- MOLINAS, P. A. *Simulação numérica da estratificação térmica em reservatórios*. 1991. 134 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica)-Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1991.
- MOLLE, F. *Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento*. Mossoró: Coleção Mossoroense, 1991.
- ORLOB, G. T. *Mathematical modeling of water quality: streams, lakes, and reservoirs*. Chichester: Wiley, 1982.
- PAIVA, E. M. C D. *Modelação hidrossedimentométrica e da qualidade da água da bacia hidrográfica do Arroio Vacacai-Mirim*: relatório de pesquisa. Santa Maria: FINEP/REHIDRO/SUBREDE3, 1999. 50 p.

- RAJAR, R.; CETINA, M. Hydrodynamic and water quality modeling: an experience. *Ecological Modeling*, Ljubljana, v. 101, p. 195-207, 1997.
- SCHÄFER, A. *Fundamentos de ecologia e biogeografia das águas continentais*. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1984.
- SHANAHAN, P.; HARLEMAN, D. R. F. Transport in lake water quality modeling. *ASCE J. Environ. Eng. Div.*, Illinois, v. 110, n. 1, 1984.
- SOFTWARE ArcGIS for desktop: version 9.3. Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2008. 1 DVD-ROM.
- SOFTWARE MATLAB 2009 release: version beta. MathWorks, 2009. 1 DVD-ROM.
- SOFTWARE Microsoft Visual Basic for Windows Vista: version 6.0. Microsoft Corporation, 2009. Conjunto de programas. 1 DVD ROM.
- SOUZA, R. S. *Simulação hidrodinâmica da qualidade da água: estudo de caso: ajuste do modelo CE-QUAL-W2 à sub-bacia do Arroio Demétrio, bacia hidrográfica do Rio Gravataí/RS*. 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) -Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.
- Software ET GeoWizards, version 9.3. TCHOUKANSKI, I., 2009. 1 CD-ROM.
- THOMANN, R. V. *Principles of surface water quality modeling and control*. New York: Harper International, 1987.
- THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. *Principals of surface water quality modeling and control*. New York: Harper and Row, 1987.
- TUNDISI, J.G., Limnologia de represas artificiais. *Boletim de Hidráulica e Saneamento*, São Paulo, n. 11, 1986. 48 p.