

MODELO DE SIMULAÇÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA ASSOCIADO AO SIG UMA FERRAMENTA DE APOIO A DECISÃO - ESTUDO DE CASO: RIO PARAÍBA DO SUL

Mariana Dias Villas-Boas¹ & Marcelo Gomes Miguez²

RESUMO--- Este trabalho estuda e propõe a utilização de uma ferramenta matemática de apoio à decisão, para consubstanciar decisões no âmbito do gerenciamento dos recursos hídricos. A ferramenta proposta constitui-se de um modelo de qualidade de água, aliado a um sistema de informações geográficas (SIG). O modelo escolhido como base para o trabalho foi o MODCEL, que já tinha módulos operacionais em hidrologia e hidrodinâmica, e o SIG foi o ARC GIS 9.1. Este trabalho foi responsável pela implementação do Módulo de Qualidade da Água no MODCEL, que ainda não havia sido aplicado com esta função. Foi realizado um estudo de caso na bacia do rio Paraíba do Sul, onde a metodologia proposta foi aplicada de forma efetiva, a partir do desenvolvimento de cenários, que tinham como objetivo a avaliação do impacto de intervenções para a melhoria da qualidade da água. O uso do Módulo de Qualidade da Água possibilitou a determinação do nível de qualidade que o rio se encontrava e a visualização dos efeitos de obras propostas, através do ARC GIS, sendo útil no processo de tomada de decisão.

ABSTRACT--- This work studies and proposes the use of a mathematical tool to support the management process, in order to provide an aid to the decision making of water resources management. The proposed tool is a water quality model coupled to a geographic information system (GIS). The mathematical model chosen as a working base was MODCEL, which already had operational modules in hydrology and hydrodynamics, and GIS was the ARC GIS 9.1. This work was responsible for the implementation of the Water Quality Module in MODCEL base, which had never been applied with this objective. It was studied a case in Paraíba do Sul river basin, where the proposed methodology was effectively applied, considering different scenarios of development, which had the aim of assessing the impact of interventions to improve the quality of the water at the main river of the basin. The use of the Water Quality Module allowed to determine the level of river quality and to show the effects of a set of proposed interventions.

Palavras-chave: Gestão de recursos hídricos, modelagem de qualidade da água, Paraíba do Sul

1) Engenheira Hidróloga – CPRM - - Serviço Geológico do Brasil, Av. Pasteur, 404, 22290-040 Rio de Janeiro. E-mail: marianadvb@rj.cprm.gov.br

2) Professor Adjunto - Escola Politécnica da UFRJ, DSc., Centro de Tecnologia - Bloco B - Sala 101 - Ilha do Fundão Caixa Postal 68506 - CEP: 21945-970 Rio de Janeiro - RJ. E-mail: marcelomiguez@poli.ufrj.br

1.0. INTRODUÇÃO

A demanda de água cada vez maior, aliada a multiciplicidade do seu uso tem provocado crises de escassez, gerando conflitos de várias espécies na bacia. Tais conflitos fizeram com que o planejamento dos recursos hídricos passasse a demandar a consideração, de forma conjunta, de aspectos quantitativos e qualitativos. Estes últimos não eram priorizados no passado, fazendo com que os recursos hídricos só fossem pensados sob o ponto de vista da quantidade. Pode-se notar este fato, por exemplo, na disponibilidade de séries de dados históricos: as séries de medições de dados quantitativos apresentam-se em uma quantidade muito superior e com períodos muito mais longos de observação.

Assim, a qualidade da água passou a ser tão importante quanto a quantidade, de tal maneira que é possível notar um maior detalhamento e uma maior frequência de análise, ainda, muito longe do ideal. Pois há rios que, embora com vazão suficiente para sustentar determinados usos, devem ser restringidos a uns poucos em razão da poluição. Tal poluição está, intimamente, ligada a esses usos e aos do solo e tem como principal fonte, nos rios brasileiros, o lançamento de efluentes, domésticos e industriais, sem qualquer tratamento ou com tratamento ineficaz. O aumento da poluição faz com que os rios tenham um poder de autodepuração cada vez menor.

Visando-se uma melhor abordagem do problema, o seu estudo pode ser feito com o uso de modelagem de qualidade da água que constitui uma ferramenta muito importante para o conhecimento e controle da qualidade da água, capaz de representar as complexas relações ocorridas no corpo d'água. Permite analisar o comportamento do rio após a emissão de poluentes, avaliar a capacidade de autodepuração e mensurar a carga que o mesmo pode suportar, viabilizando posteriores intervenções mais eficazes na manutenção ou melhoria da qualidade da água.

Além disso, é possível caracterizá-la como uma ferramenta de apoio a decisões operacionais voltadas para o gerenciamento dos recursos hídricos. Pois, geralmente, o tomador de decisões, por força de suas atribuições, possui uma visão abrangente de seu campo de atuação e dos programas de ação, com os quais almeja a realização dos objetivos. No entanto, ao passar à fase de implementação são necessárias ferramentas apropriadas, que permitam resolver os problemas práticos encontrados na implementação de suas metas, Campos (2003). Isso se aplica, por exemplo, no âmbito da Gestão dos Recursos Hídricos, às Agências de Bacia, que auxiliam os Comitês, tecnicamente, na determinação dos problemas da bacia e nas metas que precisam ser cumpridas para resolução dos mesmos.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo o estudo e a proposição de ferramentas de apoio a decisão a fim de serem utilizadas na gestão dos recursos hídricos. Essas ferramentas seriam: os Modelos de Qualidade da Água aliados a Sistemas de Informações Geográficas.

2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A prática de gestão de recursos hídricos no Brasil vem sofrendo uma evolução no tempo condicionada, principalmente, pela crescente mobilização da sociedade.

O Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos no Brasil foi estabelecido pela Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, tendo como principais objetivos: coordenar a gestão integrada das águas; arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos; implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos; planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos; e promover a cobrança pelo uso dos recursos hídricos.

As ferramentas de apoio a decisão são cada dia mais utilizadas nos processos decisórios no âmbito do gerenciamento de recursos hídricos, que possuem certa complexidade, de forma a auxiliar e fundamentar o tomador de decisões na sua escolha.

Dentro desta ótica, os modelos constituem uma ferramenta integradora, sem a qual dificilmente se consegue uma visão dinâmica de processos envolvidos nos sistemas ambientais, auxiliando, assim, na simulação das situações envolvidas no problema que se deseja solucionar, Rosman (2001).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) constituem uma outra importante ferramenta de apoio a decisão que auxiliam na representação gráfica, ou melhor, geográfica das informações.

As metodologias usuais têm procurado integrar subsistemas de modelagem científica com tecnologias de Geoprocessamento, em especial Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sensoriamento Remoto. Estes permitem a organização da base de dados, são dotados de ferramentas de análise espacial e representação gráfica, facilitando a operação e a análise de resultados do estudo de modelagem.

Segundo o PQA (1998), para a escolha da melhor alternativa de intervenção com vistas à recuperação ambiental do rio Paraíba do Sul faz-se necessária a utilização de um conjunto de metodologias de apoio a decisão que assegurem maior retorno sócio-econômico e ambiental dos investimentos a serem feitos. São citados dentre os instrumentos de apoio a decisão a serem desenvolvidos: a “Modelagem de Qualidade da Água” e o “SIG e Banco de Dados”.

Com este foco, nesse trabalho, serão utilizadas essas duas ferramentas de apoio a decisão, quais sejam: Sistema de Informações Geográficas e Modelo de Qualidade da Água.

2.1. O Modelo de Qualidade de Água - MODCEL

O MODCEL é um programa elaborado em linguagem “Delphi” que dispõe de interfaces amigáveis e simples para os usuários de modelos, desenvolvido com a finalidade de permitir

simulações de diversos processos que interferem com a quantidade e a qualidade de água na bacia, Magalhães (2005).

A concepção do modelo parte do princípio de que uma bacia pode ser subdividida em um conjunto de compartimentos homogêneos, interligados, chamados de células de escoamento, que se integram no plano da bacia em um arranjo capaz de reproduzir os padrões de escoamento que ocorrem. Esse arranjo se dá a partir das interações entre as células, modeladas através das suas ligações, que formam uma rede de fluxo bidimensional com possibilidade de escoamento em várias direções. As ligações entre as células são feitas por meio dos centros de células que reúnem todas as informações necessárias para o escoamento, Gomes (2004). O MODCEL possui quatro módulos que funcionam de forma integrada: hidrodinâmico, hidrológico, de qualidade da água e de gerenciamento, neste artigo dar-se-á ênfase ao módulo de qualidade de água. A Figura 1 ilustra a interligação entre esses módulos.

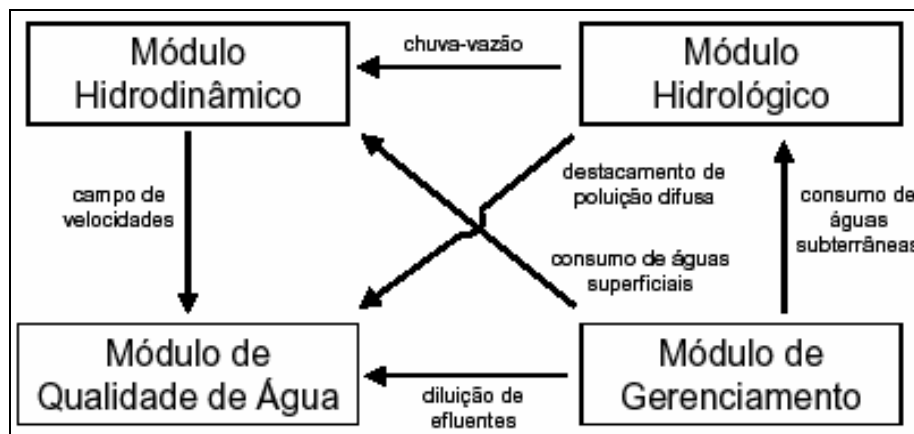


Figura 1. Interligação entre os módulos do MODCEL (Fonte: MAGALHÃES (2005)).

O Módulo de Qualidade da Água foi desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional – LHC, na COPPE/UFRJ, para funcionar de forma acoplada aos Módulos Hidrodinâmico/Hidrológico/Gerenciamento. Assim, possui a mesma estrutura e lógica deste e utiliza os seus arquivos de saída, no formato em que são produzidos, como dados de entrada. Mas, diferentemente, dos outros que funcionam em um mesmo aplicativo, ele funciona de forma isolada e os arquivos de saída dos outros módulos devem ser levados, ainda, de forma manual para, este.

O detalhamento deste módulo é importante, em razão desse trabalho ser responsável pela implementação do Módulo, sendo a sua primeira aplicação prática. Desta forma, foram enfrentados alguns desafios e, ainda, foram realizadas algumas modificações e adaptações para o seu efetivo funcionamento, Villas-Boas (2008).

Primeiramente, é importante destacar as hipóteses nas quais teve base o desenvolvimento do Módulo e que devem ser respeitadas, são elas:

1. Cada partícula deve passar obrigatoriamente pelo centro da célula em que está antes de ser encaminhada para uma célula vizinha;
2. A seleção da célula vizinha para qual a partícula do centro de célula se encaminhará será feita de modo proporcional à vazão entre elas.
3. Se a partícula tiver com massa abaixo do valor estabelecido pelo modelador como massa mínima, ela é eliminada e sua massa redistribuída para o restante das partículas;
4. A concentração do poluente é a mesma para toda a célula.

A descrição do transporte advectivo-difusivo do poluente utiliza uma formulação que se inclui na categoria dos modelos lagrangeanos, mais especificamente, o chamado “método lagrangeano de dispersão de partículas discretas”, onde a advecção é obtida através do módulo hidrodinâmico, e a difusão é obtida internamente a partir dos parâmetros do próprio módulo.

Nesse método o poluente é dividido em um grande número de partículas discretas, com a mesma massa. As partículas são criadas a partir da massa total de poluentes que é dividida pelo valor da massa de cada partícula, estabelecido pelo usuário, resultando, então, no número de partículas. A massa da partícula é corrigida devido a um possível arredondamento no cálculo do número de partículas.

É importante destacar que quanto maior o número de partículas melhor é a representação da situação que se deseja modelar, embora haja um maior custo computacional resultando em um maior tempo de simulação. A posição da partícula é identificada pelo número da célula e da ligação que a mesma está localizada. Esta posição é determinada pelo transporte resultante do movimento do fluido no qual está contida, e da dispersão resultante de um processo aleatório.

A velocidade advectiva (V_a) da partícula é considerada idêntica à velocidade da corrente no ponto onde esta se encontra.

A velocidade difusiva (V_d) da partícula é calculada segundo o algoritmo do caminho aleatório, que corresponde ao produto da distância média percorrida em determinado intervalo de tempo por um número aleatório r , de média “zero” e desvio padrão “um”, através da equação 1:

$$V_d = (2r - 1) \sqrt{\frac{6D}{\Delta t}} \quad (1)$$

onde: r = número aleatório gerado pela função randomize;
 D = coeficiente de dispersão.

A partir do cálculo das velocidades é possível determinar a posição de cada uma das partículas em relação à célula de escoamento pertinente.

Passa-se para a próxima etapa, então, que corresponde a “parcela biogeoquímica” da modelagem. Nesta etapa, o curso d’água passará pelo “processo de desoxigenação”. Esse processo tem origem em um dos principais efeitos que a matéria orgânica ocasiona no curso d’água: o decaimento da “Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO”. Este processo pode ser expresso por uma equação de primeira ordem na qual a taxa de mudança da concentração é proporcional à primeira potência da concentração. A Equação 2 descreve o fenômeno:

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 \cdot L \quad (2)$$

onde: L = concentração de DBO remanescente (mg/l)

t = tempo (dia)

K_1 = coeficiente de desoxigenação (dia⁻¹)

Essa equação demonstra que a taxa de oxidação da matéria orgânica (dL/dt) é proporcional à matéria orgânica presente na água. Dessa forma, quanto maior a concentração de DBO, ou seja, quanto mais poluído estiver o corpo d’água, mais rapidamente se processará a desoxigenação. Este processo é modelado em função da massa das partículas em cada uma das células.

O Módulo de Qualidade, atualmente, encontra-se preparado para simular corpos hídricos que possuam como parâmetro indicativo da poluição a DBO. Caso o usuário queira modelar outro parâmetro, será necessária uma adaptação do modelo nessa etapa.

O próximo passo é a retirada de partículas que é feita pelos usuários-captadores. A partir da concentração da célula no intervalo de tempo anterior e a vazão de cada captação, é calculada a massa de poluente retirada e, assim, o número de partículas retiradas.

Por último, então, procede-se ao cálculo da concentração final de cada uma das células, a partir da massa e quantidade de partículas, que corresponderá ao dados de saída do modelo em cada intervalo de tempo.

2.2. Sistema de informações geográficas

Os Sistemas de Informações Geográficas – SIGs são estruturas de processamento automático de dados destinados ao armazenamento, recuperação e transformação de dados, Xavier da Silva *et al.* (1991). Segundo Campos (2003), são sistemas computacionais de ajuda à aquisição, armazenamento,

análise e apresentação de dados geográficos naturais (rios, relevo, vegetação) ou antrópicos (reservatórios, estradas, cidades).

O Software selecionado para o estudo foi o Arc GIS 9.1 que correspondente a um sistema de informação geográfica caracterizado para visualização, gerenciamento, criação e análise de dados distribuídos espacialmente. A partir dele, é possível entender o contexto geográfico de um dado, visualizar as inter-relações e identificar padrões. É uma ferramenta importante de auxílio na melhor tomada de decisão e na solução mais rápida de problemas.

3.0. METODOLOGIA

A aplicação da modelagem de qualidade de água agregada ao sistema de informações geográfica foi desenvolvida a partir da seguinte metodologia, dividida, a seguir, em etapas:

1. Determinação da área de estudo obedecendo aos seguintes requisitos: existência de Comitê e Agência de Bacia Hidrográfica, relevância sócio-econômica e problemas relevantes de qualidade da água e delimitação do trecho para a realização das simulações de forma mais detalhada;
2. Caracterização da região de estudo, compreendendo um cuidadoso levantamento cartográfico e de estudos já realizados na região;
3. Levantamento do cadastro de usuários da bacia que contivesse a sua localização e dados do seu uso.
4. Pesquisa dos históricos de dados hidrológicos existentes, de forma avaliar a existência de informações em quantidade e qualidade suficiente que permitissem a aplicação do modelo de qualidade da água;
5. Seleção criteriosa das estações fluviométricas, pluviométricas e de qualidade da água, com séries de chuva e vazão e dados de qualidade confiáveis para que se pudesse realizar a calibração e validação do modelo;
6. Georreferenciamento dos postos fluviométricos, pluviométricos e de qualidade da água selecionados e dos usuários de recursos hídricos, de forma a avaliar a distribuição espacial da informação disponível;
7. Preparação dos mapas com os dados georeferenciados utilizando um Sistema de Informação Geográfica – SIG;
8. Utilização da cartografia digital disponível;
9. Calibração e validação do modelo hidrodinâmico;

10. Implementação e complementação do modelo de qualidade de água;
11. Análises de sensibilidade e definição e simulação de cenários

4.0. ESTUDO DE CASO

Neste item serão apresentados os resultados obtidos na aplicação da modelagem de qualidade da água, utilizando o MODCEL, como ferramenta de apoio a decisão associada a um sistema de informações geográficas, na bacia do rio Paraíba do Sul.

4.1. Área de estudo

A área escolhida para estudo de caso foi a bacia do rio Paraíba do Sul, localizada na região sudeste do país, em razão da sua importância dentro do cenário dos recursos hídricos no Brasil, inclusive pelo pioneirismo apresentado na implementação dos diversos instrumentos da Política de Recursos Hídricos, e pelas suas características físicas, econômicas e hidrológicas que se adequam a metodologia aqui proposta. A Figura 2 apresenta a localização da bacia do rio Paraíba do Sul.



Figura 2. Mapa de localização da bacia do rio Paraíba do Sul (Fonte: PQA (1998)).

Foi selecionado o trecho entre a UHE de Funil e as confluências do rio Paraíba do Sul com os rios Piabanha e Paraibuna que tem uma área de drenagem de 6.500 km² e uma extensão de cerca de 220 km, abrangendo 17 municípios fluminenses. Neste trecho também está localizada a transposição de cerca de 160 m³/s para o abastecimento da região metropolitana do Rio de Janeiro. A seleção do trecho teve como critérios: a compatibilidade com a estrutura da modelação, a disponibilidade de dados e a relevância da sub-bacia para a Bacia do rio Paraíba do Sul.

4.1. Coleta de Dados

Esta etapa foi uma das mais complicadas de ser alcançada devido a escassez de dados de qualidade da água que existe no país. Além disso, há uma total desconformidade entre as entidades que realizam algum monitoramento, de tal forma que é possível encontrar informações desconexas e dados não confiáveis, acrescenta-se, ainda, as diferentes metodologias de coleta, análise, diversas frequências e conjunto de parâmetros.

O primeiro passo foi a busca pelos dados de qualidade da água. Esses foram reunidos de campanhas de qualidade da água realizadas pela Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais no âmbito do projeto Paraíba do Sul “Cooperação França-Brasil”, entre os anos de 1992 e 1997. A frequência das análises da qualidade da água não era a ideal e nem mesmo uniforme, uma ou duas vezes a cada mês, com alguns meses sem análise.

Com a aquisição dos dados, passou-se a contabilização de captações e lançamentos, através do “Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos – CNARH”, fornecido pela ANA. O Cadastro ainda não havia sido finalizado, mas era mais atual do que os dados de qualidade disponíveis, assim, para fins de pesquisa e aplicação dessa ferramenta de apoio a decisão, ele foi utilizado na calibração e aplicação do modelo.

O cadastro conta com dados dos usuários, tais como: cargas e vazões lançadas e/ou captadas, dentre outros. Foram utilizados para as simulações as cargas máximas e médias, tratadas e brutas, lançadas pelos usuários e as vazões captadas e lançadas. A área de estudo conta com um total de 120 lançamentos e 76 captações, sendo que alguns desses pontos pertencem a um só usuário.

Os dados pluviométricos e fluviométricos foram conseguidos através do cadastro de estações HIDROWEB no site da ANA e complementações com auxílio do banco de dados da “Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais – CPRM”, operadora de grande parte da rede de estações da ANA. Nesta etapa, também foram adquiridos alguns dados de qualidade da água que servirão para complementar e confirmar aqueles advindos da “Cooperação França-Brasil”.

Nesta etapa, foi utilizado então uma das ferramentas de apoio à decisão desse estudo: o Arc GIS. Foram reunidas bases cartográficas (Cartas Topográficas Vetoriais do Mapeamento Sistemático – 1:250.000 redes hidrometeorológicas e outras informações sobre a bacia do rio Paraíba do Sul fornecidas de maneira rápida e eficiente, pela CPRM, juntamente com os dados coletados. Através do Arc GIS foi possível selecionar as informações pertinentes apenas a área de estudo e encontram-se apresentadas na Figura 3.

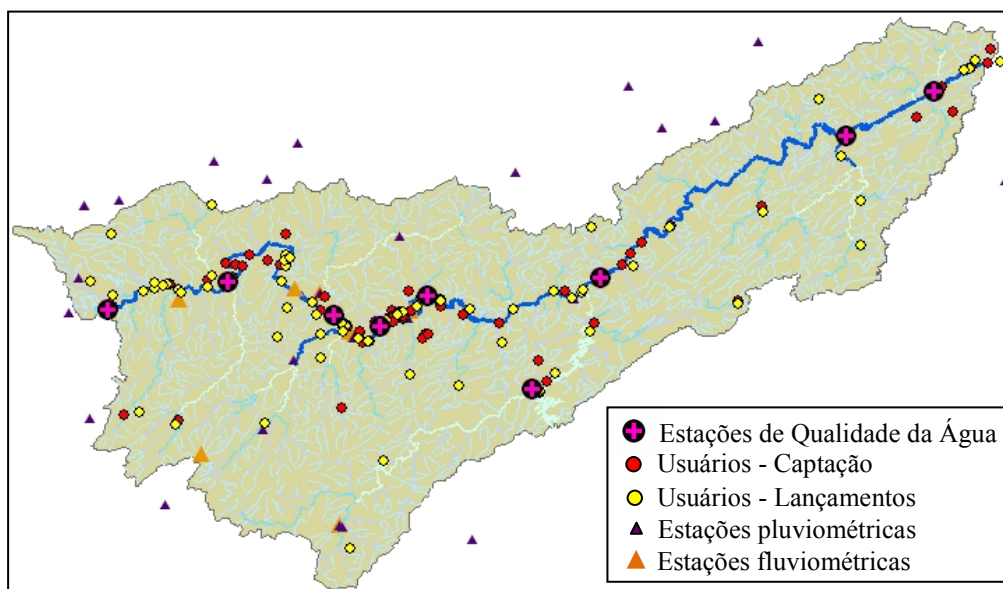


Figura 3 – Mapa em Arc GIS que reúne os dados e informações coletados para a modelagem.

4.2. Calibração

Realizada a coleta de todos os dados necessários, pôde-se, então, dar início a calibração da área de estudo utilizando o MODCEL. Foi estabelecido um intervalo de tempo de um ano para realização das simulações e um delta t de quatro horas. Os anos escolhidos para calibração e validação do módulo hidrodinâmico foram, respectivamente, 1995 e 1997, já para a calibração do módulo de qualidade, o ano de 1995. Esta escolha foi feita de acordo com a disponibilidade dos dados coletados. Nesse trabalho, apenas serão apresentados os detalhes e resultados do módulo de qualidade de água, os resultados dos demais módulos podem ser encontrados em Villas-Boas (2008).

Foi realizada a divisão em células de escoamento também com auxílio do Arc GIS em 36 células de rio. Em razão de o foco ser o rio principal, o Paraíba do Sul, seus afluentes foram modelados como condições de contorno, com concentração de 2 mg/l, de acordo com o PQA (1998). Além deles, foi estabelecida como condição de contorno de entrada a defluência do Reservatório de Funil com concentração de DBO correspondente a estação de qualidade logo na entrada da bacia. A condição inicial do rio foi estabelecida com os dados da amostragem do ano anterior.

Como os dados disponíveis para a calibração possuem frequências diversas e não estão igualmente distribuídos no tempo e no espaço, optou-se pela seguinte forma de calibração e apresentação: os dados de saída do modelo foram organizados por mês e, para cada um dos meses, foram calculados os valores mínimos, máximos e médios. Como a saída é a concentração em cada célula, foram plotados gráficos de concentração versus extensão do rio, para cada mês de simulação,

juntamente com pontos referentes à amostragem. Os meses de simulação foram: março, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, novembro e dezembro). Os meses de janeiro, fevereiro e outubro não foram calibrados por falta de dados das campanhas de coleta de amostras.

Foram realizados testes para caracterizar a influência de cada dado de entrada nos resultados da modelagem e, ainda, análises de sensibilidade para avaliação do comportamento dos coeficientes de desoxigenação e de dispersão, Villas-Boas (2008).

No primeiro caso, pôde-se notar que as concentrações nos primeiros 50 quilômetros do rio são, majoritariamente, influenciadas pela condição de contorno de entrada, representada pela UHE Funil, ou seja, pela carga de DBO gerada a montante do trecho de estudo. Os afluentes alteram muito pouco a concentração final do rio em comparação a outras fontes. A influência dos usuários de lançamento inicia-se, somente, a partir do quilômetro 70, sendo que entre os quilômetros 140 e 170, eles passam a contribuir com a maior parte da carga na concentração final do rio.

Nas análises de sensibilidade, foram variados os coeficientes de desoxigenação e de dispersão utilizados na modelagem e pôde-se constatar que o coeficiente de desoxigenação apresenta uma maior sensibilidade a cargas altas de lançamento. Não eram esperadas, assim não o foram, grandes variações das curvas em relação ao coeficiente de dispersão, pois os efeitos dispersivos são melhores observados em cargas não-contínuas, o que não era o caso.

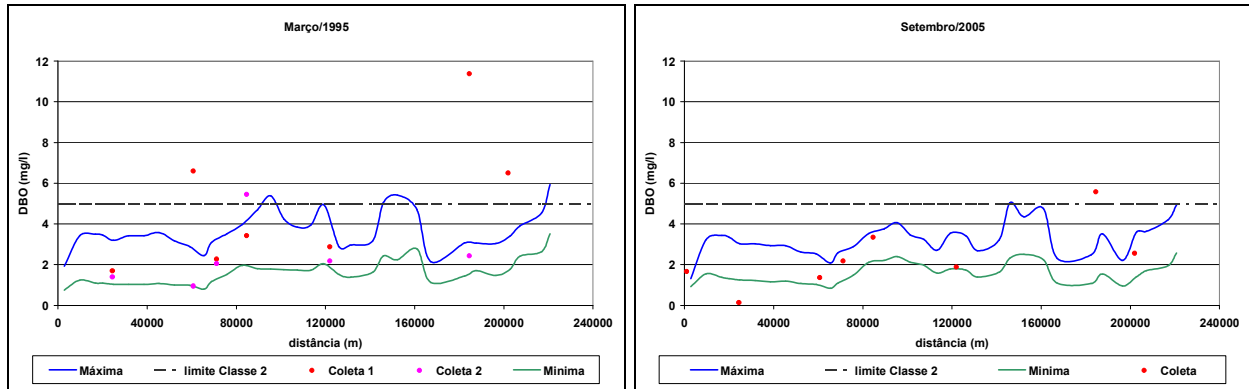
Assim, foi possível estabelecer o cenário de calibração para ser utilizado na aplicação que conta com as seguintes características: lançamento de carga média tratada dos usuários, coeficiente de desoxigenação no valor de 0,25 e com coeficiente de dispersão igual a 32.

As Figuras 4 e 5 representam este cenário para os meses de cheia, março e setembro de 1995 e as Figuras 6 e 7 para os meses de estiagem, junho e julho de 1995. Os valores de concentração máxima e mínima foram plotados como curvas limitando a faixa possível de ocorrência de concentrações. Os dados das campanhas foram plotados como pontos, no mesmo gráfico. A calibração seria tão boa quanto maior número de pontos estivesse entre das duas curvas.

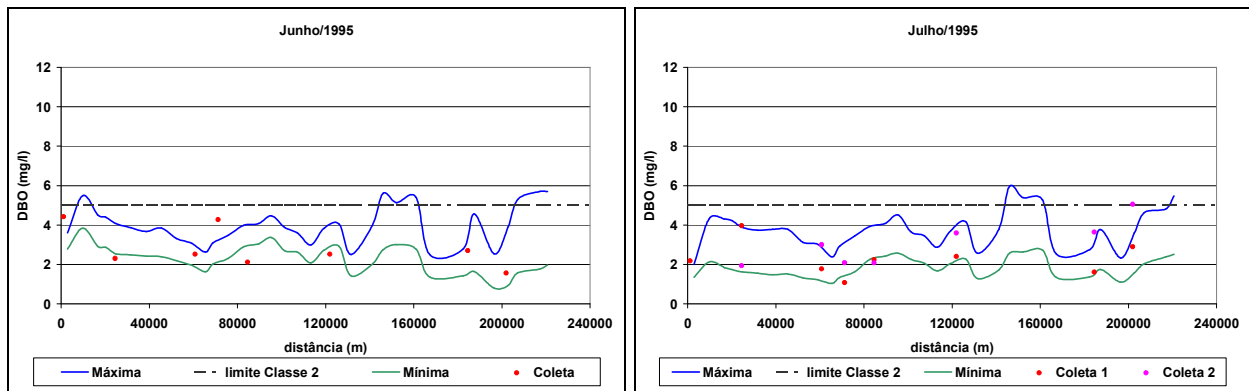
Para o mês de março, obteve-se bons resultados, dos treze valores obtidos com as coletas, nove ficaram entre as curvas de concentrações mínimas e máximas. No mês de setembro, o modelo apresenta um comportamento que permite que a maioria dos pontos se encontre na faixa de calibração, conforme pode ser observado na Figura 5.

No mês de junho, embora menos da metade dos pontos relativos às coletas esteja na faixa possível do modelo, o restante está bem próximo das curvas, conforme pode ser visto na Figura 6, verificando que o modelo segue a tendência das coletas. Já para o mês de julho a calibração é bem

melhor, conforme a Figura 7, com quase todos os pontos na faixa do modelo, e o restante muito próximo às curvas.



Figuras 4 e 5. Calibração do módulo de qualidade para os meses de cheia, março e setembro - 1995.



Figuras 6 e 7. Calibração do módulo de qualidade para os meses de estiagem, junho e julho - 1995.

Em todos os cenários simulados durante o processo de calibração, foi possível constatar que as concentrações nos meses de estiagem variam muito pouco entre a mínima e a máxima em relação a dos meses de cheia. Isso ocorre, principalmente, devido à variação das vazões.

Dessa forma, é interessante a análise das concentrações do trecho de estudo em relação às vazões ocorridas como pode ser observado nas Figuras 8 e 9, correspondentes a concentração média de DBO do mês de março e de junho de 1995, representando o período de cheia e estiagem, respectivamente, onde se encontram também, localizados, os afluentes e os usuários de forma a analisar a influência de cada um nas concentrações.

Uma primeira consideração que deve ser feita é a respeito da influência das cargas lançadas nas concentrações finais do rio, é possível notar que nos meses de estiagem as cargas lançadas pelos usuários possuem um impacto muito maior do que nos meses de cheia. Há uma situação que representa muito bem esta afirmação em todos os gráficos: dois picos entre os quilômetros 120 e 160. O primeiro

pico tem a sua origem no usuário captador que representa a transposição, que ao captar reduz a vazão aumentando a concentração; já o segundo é influenciado pelos usuários de lançamento posicionados entre os dois picos. Comparando-se as Figura 8, que corresponde a um mês de março (cheia), com a Figura 9, que mostra um mês de junho (estiagem), é possível notar a prevalência do segundo pico, na primeira e uma igualdade entre os dois, na segunda. Quanto às concentrações, elas são maiores nos meses de estiagem, conforme as Figura 9, e, menores nos meses de cheia, Figura 8.

Nota-se que o rio apresentou, quase em toda a extensão do trecho considerado, concentrações correspondentes a classe 2, conforme seu enquadramento. O que confirma os resultados obtidos no COPPETEC (2006). Nota-se que as concentrações são mais altas no trecho intermediário entre as cidades de Barra Mansa e Barra do Pirai.

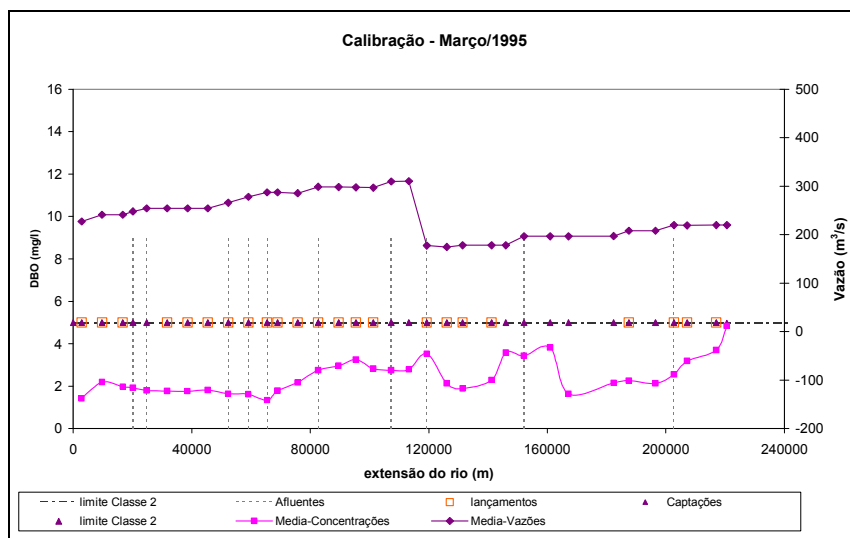


Figura 8. Cenário de calibração para o mês de março de 1995.

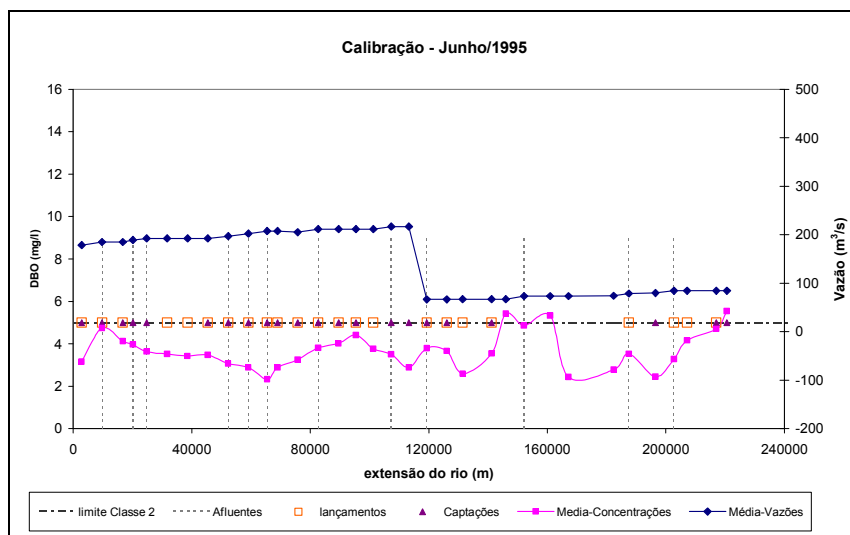


Figura 9. Cenário de calibração para o mês de junho de 1995.

O cenário de calibração foi comparado com a calibração feita para o Plano de Bacia do rio Paraíba do Sul, COPPETEC (2006), a partir da aplicação do modelo QUAL2E para o trecho de estudo conforme apresentado anteriormente. O período de análise foram os meses de estiagem, de junho a setembro, utilizando a vazão média dos anos de 1991 a 1997. As campanhas de amostragem de qualidade da água utilizadas foram as mesmas dessa dissertação, relativas ao Projeto Cooperação França-Brasil.

Na Figura 10 foram plotadas as curvas de concentração média de DBO referentes à calibração do Módulo de Qualidade da Água para os meses de junho, julho, agosto e setembro juntamente com a curva de calibração de modelo QUAL2E para o mesmo período em relação ao trecho selecionado e os valores máximos, médios e mínimos referentes as dados das coletas de amostras. É possível notar que as curvas ficaram próximas e em alguns trechos ambas sobem ou descem, como, por exemplo, entre os quilômetros 70 e 90 e entre 100 e 120, respectivamente, sendo mais um indicativo do bom funcionamento do modelo.

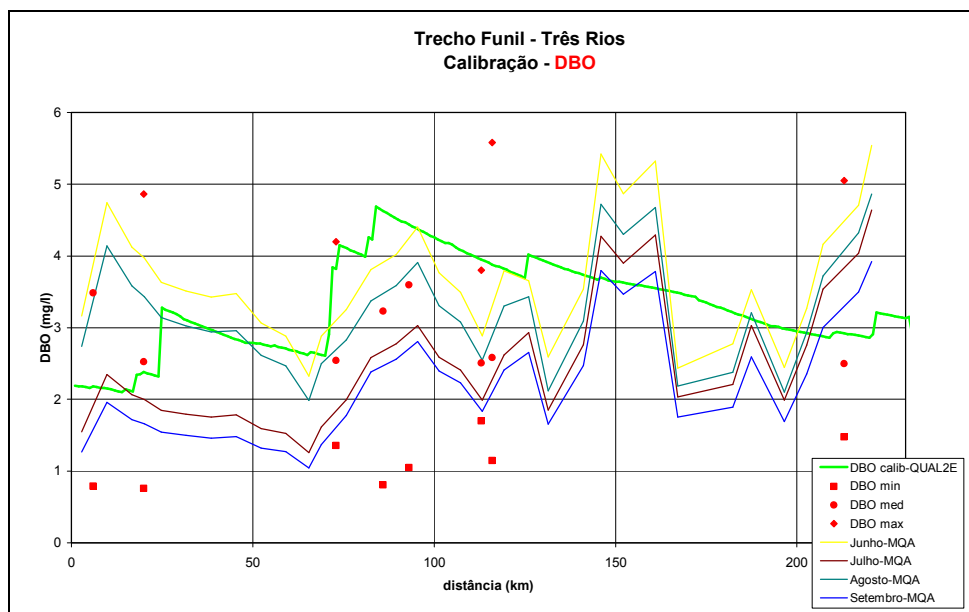


Figura 10. Gráfico de comparação da calibração do modelo QUAL2E e do módulo de qualidade (Fonte: adaptado de PQA (1998)).

4.3. Aplicação

Após a implementação e calibração do modelo, partiu-se para a aplicação, que consistiu na definição de cenários que demonstrassem os efeitos causados pela realização de intervenções na bacia que visassem a melhoria da qualidade da água. Foram definidos dois cenários para aplicação, conforme será apresentado a seguir, cujos resultados foram plotados juntamente com o cenário de calibração.

4.3.1. Cenário I

No Cenário I foi proposta a seguinte intervenção: realização de tratamento primário convencional nos efluentes de todos os usuários que não apresentavam tratamento algum. Este tipo de tratamento, segundo dados fornecidos por Von Sperling (1996), possui uma eficiência de remoção de 30 a 35% para DBO. Dessa forma foi adotado o percentual de 35% de redução para todos eles.

4.3.2. Cenário II

No Cenário II foram considerados os mesmos usuários de lançamento, entretanto, o tratamento implantado foram as “lagoas facultativas” que possuem uma eficiência de remoção de DBO de 75 a 85%, de acordo com Von Sperling (1996). Foi adotado o percentual de 85% para o cenário.

A Figura 11 apresenta o mapa da área de estudo com o total de usuários de lançamento e aqueles selecionados para os cenários.

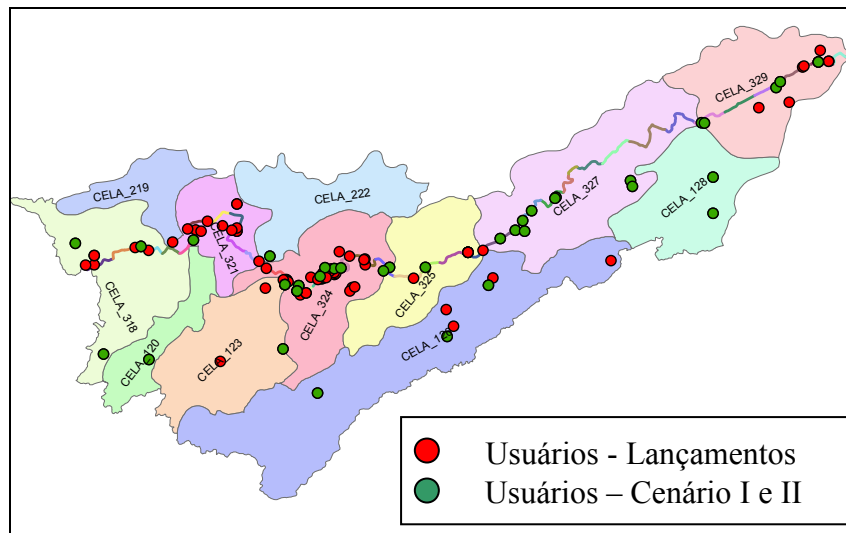


Figura 11. Mapa da área de estudo com os usuários de lançamentos selecionados para o Cenário I e II.

As Figuras 12 e 13 apresentadas, a seguir, trazem os resultados obtidos nos cenários I e II, para os meses março e junho, respectivamente, comparados com o cenário de calibração.

É possível notar os efeitos causados pelos dois cenários na concentração do rio. Os efeitos só começam a ser sentidos a partir do quilômetro 60, pois a influência dos usuários só se inicia neste local como já apresentado anteriormente. Observa-se, também, que os efeitos dessas intervenções são mais intensificados nos meses de estiagem.

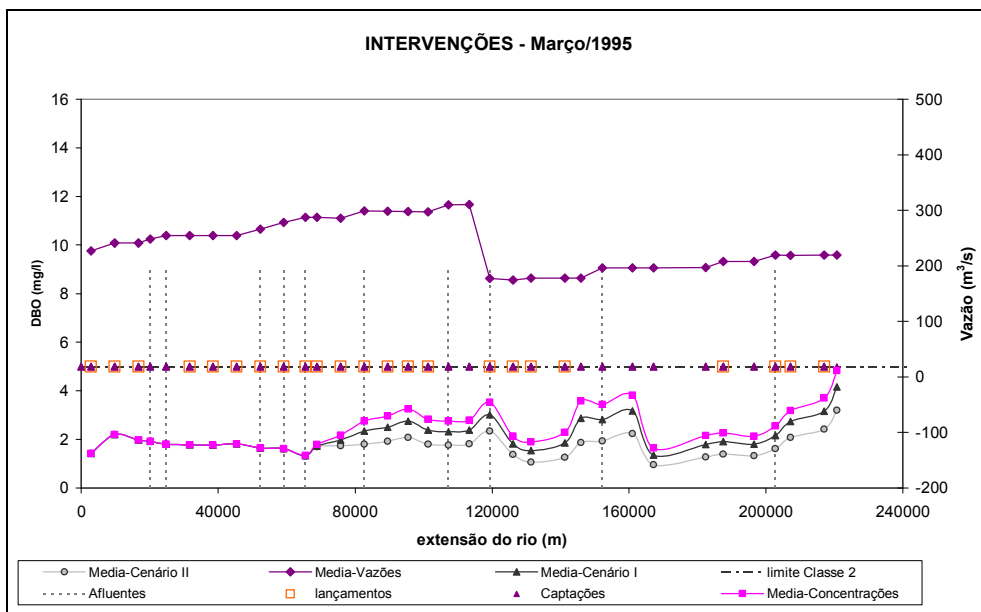


Figura 12. Resultados das intervenções propostas nos Cenários I e II para o mês de março de 1995.

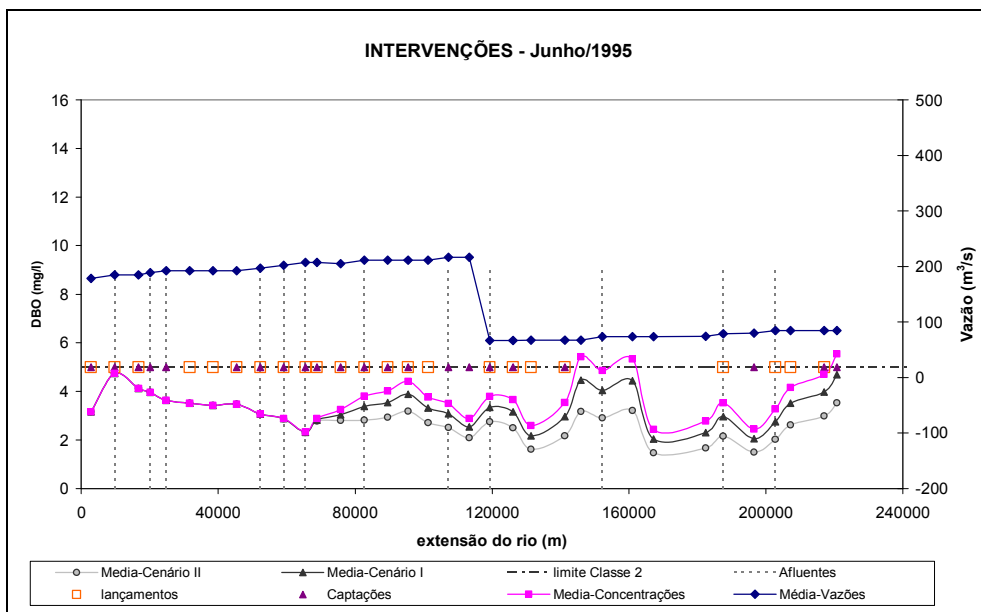


Figura 13. Resultados das intervenções propostas nos Cenários I e II para o mês de junho de 1995.

Para a apresentação dos resultados foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas com base nas classes de uso da Resolução CONAMA 357/2005. Foram escolhidas cores para cada uma das classes, com as quais as células foram preenchidas de acordo com a concentração resultante do modelo. Para exemplificar a situação, foi escolhido o mês de junho, que obteve as piores concentrações para a estiagem.

A Figura 14 apresenta as classes para o Cenário de Calibração. A Figura 15 apresenta as classes para o cenário I e a Figura 16 para o Cenário II. É possível notar que com as intervenções do cenário 1, os poucos trechos que violaram a Classe 2 deixaram de violar. Com as intervenções do Cenário II, o trecho influenciado pelos usuários, torna-se, em sua maioria, Classe 1.

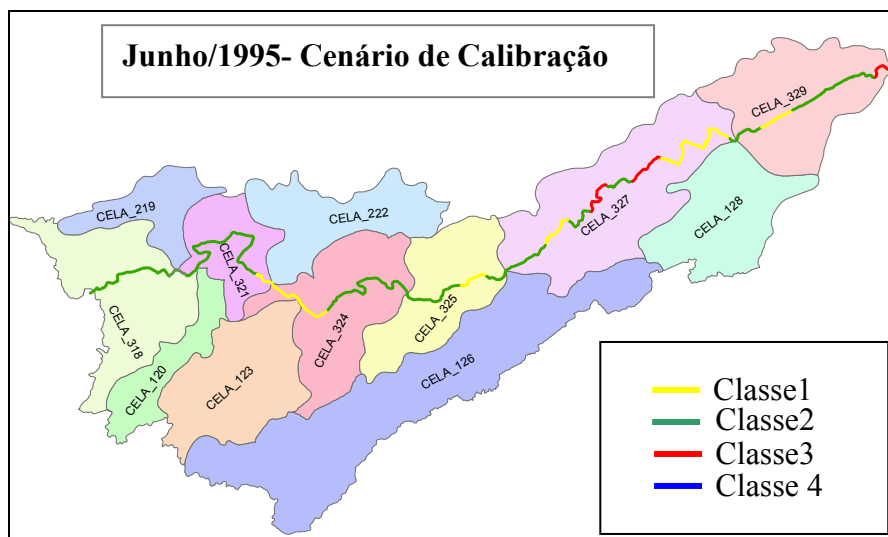


Figura 14. Apresentação dos resultados do Cenário de Calibração com o uso do Arc GIS 9.1 para o mês de junho/1995.

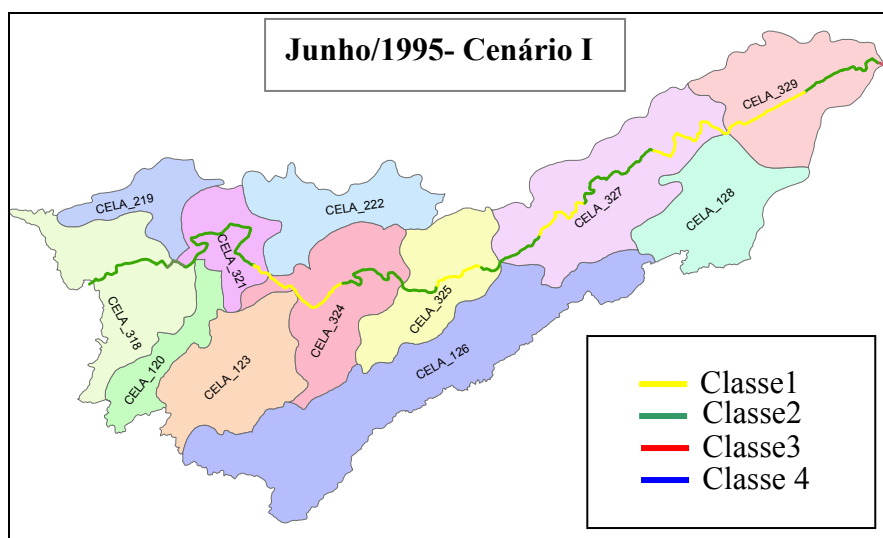


Figura 15. Apresentação dos resultados do Cenário I com o uso do Arc GIS 9.1 para o mês de junho/1995.

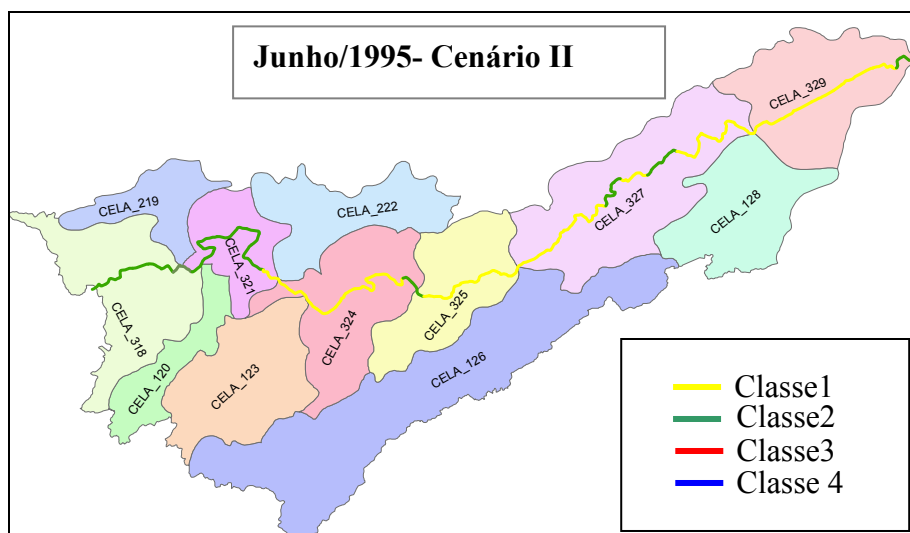


Figura 16. Apresentação dos resultados do Cenário II com o uso do Arc GIS 9.1 para o mês de junho/1995.

5.0. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A preocupação relacionada aos recursos hídricos no Brasil evoluiu muito na última década com a edição da Lei 9.433/97. Dentro desse contexto, identificou-se a necessidade de ferramentas que possam ser utilizadas com o intuito de auxiliarem os gestores no processo de tomada de decisão em relação aos problemas de gestão de recursos hídricos, qual seja, a modelagem de qualidade de água associada a um sistema de informação geográfica.

A modelagem de qualidade de água foi realizada utilizando o modelo de células MODCEL sendo necessários ajustes conceituais e operacionais, bem como a condução de uma série de testes de avaliação da confiabilidade e consistência dos resultados obtidos. No que se refere ao módulo de qualidade de água.

O procedimento de calibração foi proposto de acordo com a disponibilidade de dados históricos para o período modelado. Os resultados alcançados foram satisfatórios em praticamente todos os meses simulados.

Através da modelagem dos dados dos afluentes, dos usuários e da defluência da UHE Funil, separadamente, foi possível avaliar a influência de cada um deles na concentração final do rio. No caso da condição de contorno de entrada, que representava a UHE Funil, notou-se que a poluição do trecho inicial é mais influenciada pelos trechos a montante do que pelos usuários do trecho. Já a influência dos usuários de lançamento só passa a ser considerável a partir do últimos dois terços do trecho estudado, sendo mais determinante ao final do segundo terço. Nesse caso de estudo, os afluentes não

apresentaram contribuição significativa. Também foi possível notar a importância da consideração dos usuários captadores, que antes não possuíam representação.

A partir dos testes de sensibilidade, o comportamento dos dois coeficientes de calibração do modelo foi avaliado. O coeficiente de desoxigenação apresentou uma resposta mais expressiva quando alterado e uma maior sensibilidade a cargas altas. Já a variação dos valores do coeficiente de dispersão não gerou resultados muito expressivos, o que já era esperado pelo fato das cargas usadas serem contínuas, o que propicia o estabelecimento de um certo equilíbrio depois de passado algum tempo de atuação destes lançamentos. Por isso, recomenda-se a aplicação do modelo com cargas descontínuas em estudos futuros, para melhor avaliar o efeito deste coeficiente.

A aplicação realizada, através de um estudo de caso na bacia do rio Paraíba do Sul, demonstrou que o modelo foi implementado com sucesso. A partir dos resultados alcançados foi possível avaliar diversos aspectos do trecho estudado e do próprio modelo.

Além da modelagem de qualidade de água, foi utilizado, concomitantemente, um sistema de informações geográficas através do software Arc GIS 9.1. A partir dessa ferramenta foi possível a organização e a junção dos dados coletados para o estudo de caso. Através de suas funções, foi possível o cálculo de informações importantes para o desenvolvimento do estudo, tais como: distâncias, áreas, comprimentos; além de facilitar a visualização e a sobreposição das informações.

O uso do Arc GIS foi muito interessante na representação dos resultados, pois possibilitou a visualização de todo o rio e a demonstração dos melhoramentos que as intervenções podem ocasionar. Sendo assim uma boa ferramenta de apoio a decisão, sendo capaz de auxiliar um tomador de decisão na escolha das intervenções que deveriam ser realizadas e com que grau de prioridade. Essa avaliação poderia, então, ser feita de uma forma mais segura e com um embasamento técnico mais sólido.

Entretanto, ainda existe um caminho a ser percorrido pelo nosso país no que se refere a qualidade de água. Através desse estudo foi possível perceber os impactos negativos que a falta de dados e/ou de confiabilidade de dados proporciona. Acredita-se que os resultados das simulações poderiam ser bem melhores se existissem mais dados disponíveis

Recomenda-se que sejam feitos ajustes na programação de forma que a simulação seja realizada em um tempo menor. Além disso, é importante o acoplamento entre os módulos hidrodinâmico/hidrológico/gerenciamento e o módulo de qualidade da água para que funcionem em um mesmo aplicativo.

Já que o modelo encontra-se implementado, recomenda-se a realização de pesquisas no sentido de inserir outros coeficientes na modelagem, como, por exemplo, o coeficiente de reaeração. Também,

seria interessante, a inserção de outros parâmetros de qualidade da água no modelo, tais como: oxigênio dissolvido, coliformes fecais, etc.

Uma recomendação importante seria o acoplamento entre o MODCEL e um sistema de informações geográficas (SIG), de forma que os dados de entrada possam ser retirados do SIG de forma direta e que as saídas possam também serem visualizadas.

BIBLIOGRAFIA

CAMPOS, N., STUDART, T. (2003). *Gestão das Águas: princípios e práticas*. 2.ed. Porto Alegre, ABRH.

Fundação COPPETEC (2006). Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente. PGRH - Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

GOMES, R. M. (2004). *Implementação metodológica para quantificação dos prejuízos decorrentes de cheias urbanas aplicada ao município de São João de Meriti*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MAGALHÃES, L. P. C. de (2005). *Modelo Integrado para Simulação de Sistemas Hídricos*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PQA - Programa Estadual de Investimentos para a Bacia do Rio Paraíba do Sul – RJ (1998)- Relatório de Consolidação - Sub-Regiões A e B OS-RE-045_R0, MPO/SEPURB/PQA-ABC-PNUD-UFRJ/COPPE – Financiamento BIRD.

ROMEIRO, N. M. L. (2003). *Simulação numérica de modelos de qualidade de água usando o método de elementos finitos estabilizados*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROSMAN, P.C.C. (2001). *Um sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental*. In: Rui Carlos Vieira da Silva. (Org). Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5. 1ed. Porto Alegre, ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

TUCCI, C. E. M. (2005). *Modelos hidrológicos*. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. 2.ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS.

VILLAS-BOAS, M. D. (2008). *Modelo de Simulações de Sistemas Hídricos Complexos, integrado com avaliação de qualidade da água – Uma ferramenta de gestão para apoio à decisão*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VON SPERLING, M. (1996). *Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG.

XAVIER da SILVA, J, SAITO, C.H., BRAGA FILHO, J.R., *et al.* (1991) “Um banco de dados ambientais para a Amazônia”, *R. bras. Geogr.*, Rio de Janeiro, 53(3).