

MODELO ESPAÇO-TEMPORAL EM SIG PARA ANÁLISE DE QUALIDADE DA ÁGUA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

Spatial-temporal data model for GIS analysis of the quality of water in a watershed

JAQUELINE DORNELES DE SOUZA¹

CLAUDIA ROBBI SLUTER¹

MARIA CRISTINA BORBA BRAGA²

¹Universidade Federal do Paraná

Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas

jaquelinesouza@suderhsa.pr.gov.br; robbi@ufpr.br

²Universidade Federal do Paraná

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais

crisbraga@ufpr.br

RESUMO

Uma das funções dos Sistemas de Informações Geográficas quando utilizados para auxiliar na gestão do meio ambiente, é gerenciar as informações sobre disponibilidade e condições dos recursos naturais. As variáveis relativas a esses recursos se alteram de uma região para outra e ao longo do tempo, devido à influência de diversos fatores, sendo necessário acompanhar a dinâmica das mudanças ocorridas. Este artigo apresenta um modelo de dados espaço-temporal em SIG que possibilita identificar as alterações ocorridas na qualidade da água em uma bacia hidrográfica e relacioná-las aos eventos que as causaram e as fontes geradoras da poluição. Para testar sua eficiência, o modelo foi implementado no SIG ArcView 3.2, para a bacia do Rio Barigüi, localizada na Região Metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná, Brasil. Os dados relativos a qualidade da água utilizados referem-se ao parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO₅, que está relacionado à presença de efluentes domésticos e industriais num corpo d'água.

Palavras-chave: Modelo espaço-temporal; Sistema de Informações Geográficas; Qualidade da água.

ABSTRACT

Geographic Information Systems are used to assist the environmental management. Among others, one of its functions is to manage the information about availability

and condition of the natural resources. Those variables change from one place to another and throughout the time, so it is necessary to understand the dynamic of changes. This paper presents a space-time data model for GIS to identify the changes occurred in the quality of water in a basin and to relate them to the events and sources of pollution that has caused it. A study area was chosen in order to verify the efficiency of the model implementation which is the Barigüi River Basin and it is located at the Metropolitan Region of Curitiba, Parana State, Brazil. The water quality data used are related to the Biochemical Oxygen Demand - DBO5 parameter, which indicates the existence of domestic and industrial sewage in the rivers.

Keywords: Spatio-temporal data model; Geographic Information System; Quality of water.

1. INTRODUÇÃO

O meio ambiente é um sistema complexo e dinâmico, onde os recursos naturais, que são a energia, os minerais, o ar, a água, o solo, as plantas e os animais, sofrem os efeitos das atividades sócio-econômicas desenvolvidas pelo ser humano. A fim de melhorar a qualidade e a quantidade de vida, a curto e longo prazo, deve-se preservar os recursos naturais, evitando-se seu uso inadequado, através do planejamento das atividades humanas. Para isso torna-se necessário conhecer e entender a dinâmica dos processos naturais e os efeitos das atividades antrópicas sobre os mesmos (ANEEL & ANA, 2001). A disponibilidade dos recursos naturais altera-se em função das atividades humanas e varia ao longo do tempo (BURROUGH, 1998). Portanto, o planejamento e formulação de estratégias de desenvolvimento sócio-econômico deve se basear em informações espaço-temporais apropriadamente coletadas, gerenciadas e analisadas (WORBOYS, 1995).

Uma das grandes discussões da sociedade moderna tem sido a água como recurso natural, porém escasso. Os problemas relativos à qualidade da água são decorrentes da contaminação gerada pela disposição inadequada de: resíduos líquidos e sólidos, de natureza doméstica e industrial; alterações provocadas por empreendimentos para geração de energia, resfriamento de águas de termoeletricas, além de práticas agrícolas e criação de animais (LIMA, 2001).

As variáveis que definem os recursos hídricos variam de um local para outro e de uma data para outra, portanto, interessa, sobretudo, conhecer a sua distribuição no espaço e no tempo. Para caracterizar a situação hidrológica de uma bacia é necessária a realização de inventários que medem no campo as variáveis hidrológicas e meteorológicas (ANEEL & ANA, 2001). Além disso, para a realização de planos de prevenção e recuperação ambiental, são necessários dados, que indiquem o estado do ambiente aquático por meio de parâmetros que informam as características químicas, físicas e biológicas da água.

As informações obtidas pelos programas de monitoramento da qualidade e quantidade da água são geralmente gerenciadas por sistemas computacionais alfanuméricos e armazenam a informação temporal por meio de séries históricas. Modelos numéricos de distribuição são usados para interpolar valores das medições de chuva e vazão para uma determinada região e apesar de utilizar os dados históricos, não são gerados mapas que representem seus comportamentos espaciais, e tampouco mostram a evolução do fenômeno ao longo do tempo.

A representação espaço-temporal tem sido uma das maiores demandas de desenvolvimento e pesquisa em Sistemas de Informações Geográficas. Aplicações mais abrangentes requerem novas maneiras de representar os dados integrando a dimensão espacial e a temporal (COUCLELIS, 1999).

Os SIGs têm, historicamente, representado o mundo como se o mesmo existisse somente no presente, enfatizando sua representação espacial (PEUQUET, 1995; WORBOYS, 1995). As informações contidas em um banco de dados espacial podem ser adicionadas ou modificadas com o passar do tempo, porém a dinâmica da mudança ocorrida através dos tempos não é mantida (PEUQUET, 1999). Envolver a dimensão temporal significa tratar de questões complexas como: o que mudou em um determinado período, com que rapidez, o que pode ter causado esta mudança, o que mais aconteceu neste mesmo período, o que ocorreu antes.

Um dos principais componentes de um SIG é o banco de dados (WORBOYS, 1995), sendo que o modelo de dados adotado determina o que pode ser feito ou o que não pode ser feito, uma vez que o sistema tenha sido implementado (BEDÁRD, 1999). Como a capacidade de representação dos SIGs é limitada pela capacidade de representação de seus modelos, a representação geográfica e o modelo de dados são críticos para melhorar a qualidade dos processamentos de consultas e das análises de informações geográficas (WORBOYS, 1995).

Dentro deste contexto, SOUZA (2004) desenvolveu um modelo de dados espaço-temporal em SIG para análise da qualidade da água em uma bacia hidrográfica, com o intuito de representar a variação da qualidade da água e seu relacionamento com os eventos e as fontes de poluição que nela interferem. O modelo, baseado em eventos, foi adaptado do Modelo de Dados Espaço-Temporal baseado em Eventos – ESTDM, proposto por PEUQUET e DUAN (1995).

Para demonstrar sua eficiência, o modelo foi implementado para a bacia hidrográfica do Rio Barigüi, localizada na região metropolitana de Curitiba, capital do estado do Paraná, Brasil, utilizando-se o programa ArcView 3.2 e o banco de dados ACCESS. Para compor a base de dados foram utilizados dados de população desde 1996 até uma projeção para 2020, de indústrias, de estabelecimentos comerciais e de serviços, de estações de tratamento de esgoto, de aterros sanitários e de pontos de lançamentos de esgoto *in natura*. Foi utilizado um modelo matemático de qualidade da água, o QUAL2E para simular a influência das fontes poluidoras na qualidade da água na bacia hidrográfica.

Este artigo apresenta o modelo de dados de forma sucinta e está estruturado em etapas. Primeiramente é descrito o problema da qualidade da água. Depois são apresentados conceitos de dados e da representação espaço-temporal em SIG aplicados a questão da qualidade da água. A seguir é apresentado o modelo de dados espaço-temporal desenvolvido juntamente com os detalhes da implementação. Por último são apresentadas algumas consultas realizadas no modelo implementado e as considerações finais.

2. QUALIDADE DA ÁGUA E FONTES DE POLUIÇÃO

A quantidade e a natureza dos constituintes presentes na água variam em função do solo, das condições climáticas e do grau de poluição que lhes é conferido, especialmente pelos despejos municipais e industriais. Uma análise completa de uma água natural indicaria a presença de mais de cinquenta constituintes nela dissolvidos ou em suspensão. O fato de que uma substância esteja presente na água, não significa, necessariamente, que a água esteja poluída, pois vários outros aspectos devem ser considerados, como nível de concentração e características da substância (HEM, 1989).

Eliminar completamente a poluição é uma meta irrealista, pois o aumento da população e o desenvolvimento econômico das sociedades implicam na realização de atividades potencialmente poluidoras. É comum o estabelecimento de padrões de tolerância de concentração das substâncias na água, de acordo com o uso que se pretende fazer dessas águas. Água para abastecimento e consumo humano, por exemplo, tem padrões bem mais exigentes do que para outros usos, como agrícola ou industrial. Neste contexto, pode-se definir *poluição* por um nível de contaminação que a inviabiliza para usos pré-determinados (HEM, 1989). No Brasil, a resolução CONAMA nº 20/86 (vigente quando o trabalho foi desenvolvido) classifica os recursos hídricos em 9 classes, segundo seus usos preponderantes e estabelece o nível de qualidade (classe) a ser alcançado e/ou mantido em um segmento de corpo d'água ao longo do tempo.

Existem duas maneiras de conhecer a qualidade da água do rio, através de análise laboratorial de amostras de água coletadas em campo, e através do uso de modelos matemáticos que simulam as condições hidráulicas e a capacidade de depuração do rio.

2.1 Fontes de Poluição da Água

As duas formas em que as fontes poluentes podem atingir um corpo de água são: pontual e difusa. Uma fonte é dita pontual quando se restringe a um simples ponto de lançamento de modo que seja possível determinar a sua localização. Efluentes de Estações de Tratamento de Esgotos, descargas indústrias, efluentes de aterros sanitários são fontes pontuais. As fontes difusas caracterizam-se, por sua vez, por estarem distribuídas ao longo da superfície do solo, apresentando múltiplos

pontos de descarga resultantes do escoamento em áreas urbanas e agrícolas, e ocorrem durante os períodos de chuva (HEM, 1989). Também são ditas cargas não pontuais as cargas que não apresentam um ponto de lançamento específico, sendo despejadas ao longo das margens dos rios ou lagos (MENESES e TUCCI, 2003).

2.2 Modelo Matemático de Simulação QUAL2E

Uma das prerrogativas do gerenciamento de recursos hídricos, em relação à qualidade da água, é prever o impacto causado pela implantação de novos empreendimentos ou mudanças previstas pela ocupação humana em uma região. Para tanto, utilizam-se modelos matemáticos de simulação da qualidade da água. O modelo utilizado neste trabalho é o QUAL2E, desenvolvido e implementado em um programa, de domínio público, pela EPA-USA (Environmental Protection Agency). Neste modelo representa-se o rio por trechos que possuem características hidráulicas idênticas. Para cada trecho do rio são informados o volume de água (vazão) e as concentrações dos constituintes presentes nas cargas geradas pelas fontes de poluição difusas. Os trechos são representados por elementos computacionais de mesmo comprimento, através dos quais são informadas ao modelo, as cargas geradas pelas fontes de poluição pontuais (pelo volume de efluentes lançado e concentrações dos constituintes presentes no mesmo), e o volume de água retirado do rio pelas captações.

3. REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS E TEMPORAIS EM SIG

Segundo COUCLELIS (1999) as entidades geográficas podem ser naturais, como as montanhas, os rios, os vales, ou feições artificiais como as cidades e as rodovias. Os fenômenos são acontecimentos que alteram as entidades geográficas, tais como: incêndios, enchentes, seca, erosão, crescimento urbano.

Conceitualmente, o objetivo básico de qualquer banco de dados temporal é registrar as mudanças ao longo do tempo. Uma mudança é normalmente descrita como um evento ou um conjunto de eventos. Para o propósito da modelagem espaço-temporal a melhor definição de evento é “uma mudança no estado de uma ou mais localizações, entidades, ou ambas” (PEUQUET, 1999). Por exemplo, uma mudança nas espécies dominantes de uma floresta, um incêndio florestal, a mudança de proprietário de uma área, a construção de uma estrada, ou a mudança na qualidade da água de um rio.

As mudanças relacionadas às entidades ou regiões podem ser graduais ou repentinas. Mudanças repentinas são aquelas que ocorrem subitamente, como as causadas por uma catástrofe natural. Mudanças graduais são associadas aos processos que são contínuos na natureza, como a variação da quantidade de chuva em uma determinada bacia (PEUQUET, 1999).

Para este trabalho adotou-se que as mudanças causadas na qualidade da água ao longo do tempo são repentinas, por exemplo, o impacto causado pela instalação de

uma indústria. As mudanças ocorridas na população ou uso do solo embora sejam graduais, não são quantificadas constantemente, são conhecidas a partir de levantamentos realizados com algum intervalo de tempo, e serão também tratadas como repentinas.

4. REPRESENTAÇÃO DA VARIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA POR UM MODELO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL EM SIG

O diagrama apresentado na Figura 1 mostra as entidades envolvidas na representação espaço-temporal da qualidade da água em uma bacia hidrográfica e os relacionamentos entre elas. Este diagrama foi construído utilizando-se das técnicas de modelagem de banco de dados, o modelo E-R (Entidade-Relacionamento). A notação utilizada é adotada por KORTH e SILBERSCHATZ (1995) onde as entidades são representadas por retângulos, os relacionamentos por losangos e os atributos por elipses. As linhas conectam os atributos às entidades e as entidades aos relacionamentos. A cardinalidade é expressa nos relacionamentos, através da indicação das expressões 1:0, 1:1, 1:N, que significam que para cada ocorrência de uma entidade pode existir nenhuma, uma ou várias ocorrências de outra entidade. A generalização ou especialização de uma entidade é representada por um triângulo.

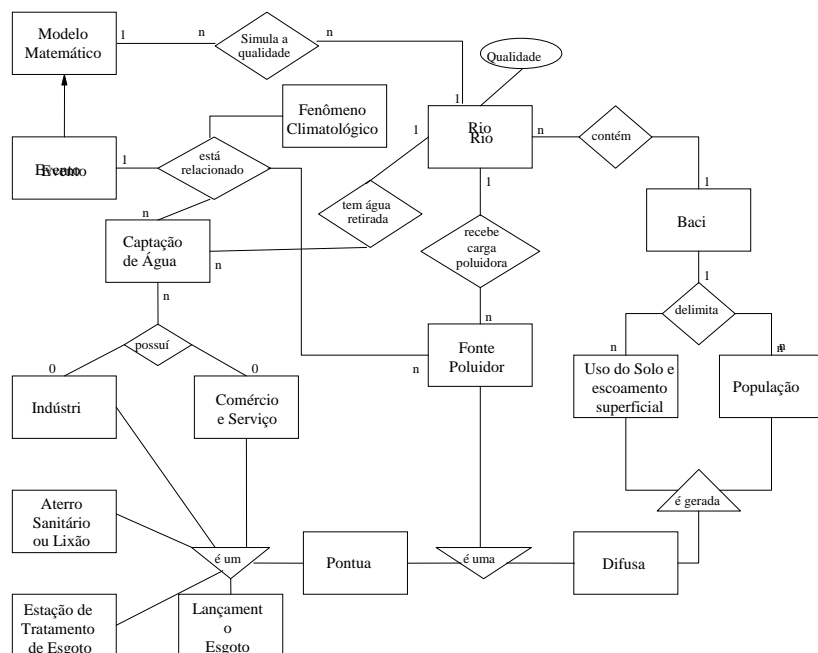
A qualidade da água é um atributo do rio, representado nesse diagrama pela entidade *Rio*, que é definida pela determinação dos valores de uma série de constituintes que são alterados em função de agentes externos. A área de influência desses agentes, cuja existência se altera entre locais e datas, é delimitada pela área de drenagem do rio que é a bacia hidrográfica (*entidade Bacia no diagrama*). No diagrama da figura 1 observamos que a bacia hidrográfica contém um ou vários (n) rios.

Os agentes externos que influenciam a qualidade da água são as fontes de poluição pontuais e difusas, as retiradas de água do rio e os fenômenos climatológicos.

O rio pode receber carga poluidora de diversas fontes de poluição, representadas no diagrama pela entidade *Fonte Poluidora*, que pode ser do tipo *Pontual* ou *Difusa*. Para os propósitos deste trabalho, uma fonte de poluição pontual pode ser uma indústria, uma estação de tratamento de esgoto, um aterro sanitário, um estabelecimento comercial ou prestador de serviços ou um ponto de lançamento de esgoto *in natura*, conforme pode ser observado na Figura 1. As fontes difusas de poluição são geradas pelo uso e ocupação do solo da área de drenagem da bacia hidrográfica e a população existente nesta área em um determinado momento.

A capacidade de um corpo d'água em assimilar substâncias poluentes é influenciada pelas retiradas de água, chuvas e períodos de seca que alteram a quantidade de água disponível em um determinado momento. Conforme se observa no diagrama da Figura 1, o rio pode ter água retirada pelas captações das indústrias e estabelecimentos comerciais e de serviços.

Figura 1 – Diagrama geral do modelo de qualidade da água.



A existência de fontes poluidoras e captações de água, a população residente e o uso do solo em uma bacia hidrográfica variam ao longo do tempo. A mudança de um estado da qualidade da água para outro é determinada pelos eventos relacionados aos agentes externos. Cada vez que ocorre um evento, é simulada a nova condição de qualidade da água do rio, através de um modelo matemático, neste caso o QUAL2E. No diagrama observamos que a entidade *Evento* pode estar relacionada a uma ou várias entidades: fenômenos climatológicos, fontes poluidoras ou captações de água.

Foram considerados como eventos, para os propósitos deste trabalho, os acontecimentos que alteram a situação das fontes pontuais e difusas, captações de água, e quantidade de água do rio, relacionados a seguir:

- Abertura ou fechamento de indústrias, estabelecimentos comerciais e

- prestadores de serviços;
- Implantação ou desativação de aterros sanitários e sistemas de tratamento de esgoto;
- Início ou fim de lançamento de esgoto *in natura*;
- Aumento ou diminuição na quantidade de efluentes lançados no rio;
- Aumento ou diminuição da quantidade de água captada do rio;
- Alteração no processo de tratamento de efluentes;
- Alteração significativa no uso do solo ou população;
- Períodos de chuva ou seca.

5. MODELO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL

A principal premissa deste modelo é que a qualidade da água do rio é alterada em função de eventos, e que, conhecendo-se quando e onde esses eventos ocorrem e quais mudanças causam, é possível entender a dinâmica da variação da qualidade da água, no espaço e no tempo. Sendo assim, o modelo foi desenvolvido visando atender os seguintes requisitos:

- Utilizar os eventos para gerenciar as mudanças ocorridas na qualidade da água;
- Tratar eventos atuais, passados e futuros e permitir a existência de realidades alternativas;
- Gerenciar os agentes externos que interferem na qualidade da água do rio, as fontes de poluição pontuais e difusas e as captações de água, conhecendo-se sua localização, período de existência e a quantidade de poluição gerada por elas;
- Tratar diferentes vazões por trecho de rio;
- Determinar a situação da água a partir do uso do modelo matemático de simulação QUAL2E e comparar o resultado com valores medidos em campo;
- Propiciar as seguintes funções de uma aplicação espaço-temporal em SIG: inventário, atualização, apresentação e análise.

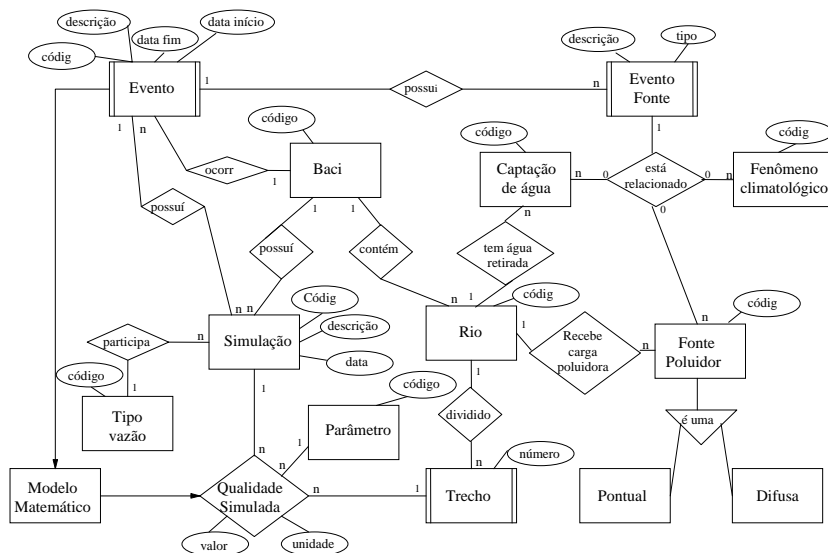
O modelo, baseado em eventos, foi desenvolvido a partir do Modelo ESTDM (PEUQUET e DUAN, 1995) que em sua proposta original emprega o modelo de dados *campo* para representar um único domínio temático. No entanto, como o rio é uma entidade discreta e o QUAL2E trata o trecho de rio como uma unidade de características homogêneas, adotou-se o trecho de rio como menor unidade para representação da qualidade da água, adaptando-se o modelo ESTDM para utilizar o modelo de representação de dados *objeto*.

O diagrama de eventos, apresentado na Figura 2, mostra que a cada ocorrência de um evento, o modelo matemático é aplicado para simular a nova condição de qualidade do rio. É criada uma entrada no banco de dados, pela adição de um registro de tempo, através da entidade *Evento*. A este registro é associada uma notação específica das mudanças ocorridas, pelo atributo *descrição*, e a informação temporal através da data de ocorrência, pelos atributos *data início* e *data fim*. Esta entidade não é ordenada temporalmente, admitindo o cadastramento de eventos

presentes, passados e futuros, tornando possível a representação de realidades alternativas.

Um evento poder ser relativo a apenas uma ou a várias mudanças, e pode, portanto, estar relacionado, através da entidade *Evento Fonte*, a diversas entidades: fontes poluidoras pontuais ou difusas, captações da água ou fenômenos climatológicos.

Figura 2 – Diagrama de eventos.



Conforme se observa no diagrama de eventos da Figura 2, o rio (entidade *Rio*) é dividido em trechos (entidade *Trecho*). Os resultados de cada parâmetro de qualidade da água, gerados pelo modelo matemático de simulação, são armazenados para cada trecho do rio através do relacionamento *Qualidade Simulada*. Sendo assim, é possível saber qual o valor de determinado parâmetro para qualquer trecho do rio em qualquer data cadastrada.

A entidade *Simulação* que armazena as informações relativas à simulação do modelo matemático de qualidade, está relacionada ao evento e conseqüentemente às entidades relativas àquele evento e aos resultados gerados pelo modelo.

Desta forma, pode-se armazenar para um mesmo rio o resultado de várias simulações, através dos trechos que podem assumir diferentes valores para diferentes datas, e identificar posteriormente quais as entidades envolvidas em determinada simulação. Como os elementos que influenciam na qualidade da água,

as fontes de poluição e as captações de água, são referenciados espacialmente e o evento tem as informações temporais, é possível saber quando e onde ocorreram mudanças, quais foram estas mudanças e através dos resultados do modelo de simulação qual o impacto dessas mudanças sobre a qualidade da água.

6. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

A bacia escolhida para implementação do modelo, a bacia do rio Barigüi apresenta problemas relacionados a ocupações irregulares, lançamento de esgotos domésticos *in natura*, disposição inadequada de lixo, dentre outros. Por abrigar a Cidade Industrial de Curitiba (CIC), a bacia concentra a maior parte das indústrias do Estado do Paraná, além de inúmeros estabelecimentos comerciais e de serviço.

No intuito de compor uma base capaz de mostrar a eficiência do modelo em simular eventos passados, presentes e futuros foram levantados dados de população de 1996, 2000, projeções para 2005, 2010, 2015 e 2020, como o trabalho foi desenvolvido em 2004, nas projeções para 2005 foram considerados os dados que representavam a situação atual. Além disso, foram levantados dados de indústrias e estabelecimentos comerciais e de serviços, estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários e lançamentos de esgoto *in natura* até 2004.

Os dados relativos às atividades econômicas e de saneamento foram provenientes do projeto Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu (SUDERHSA, 1999). Neste projeto realizou-se um levantamento dos principais empreendimentos poluidores e usuários de água da bacia: indústrias, hospitais, hotéis e motéis, restaurantes, postos de combustível, atividades comerciais relevantes, serviços de água e esgoto (captações de água, Estações de Tratamento de Esgoto - ETEs e Reatores Anaeróbicos de Leito Fluidizado - RALFs), condomínios e aterros.

Os dados de calibração do modelo matemático de simulação QUAL2E, vazões e cenários de projeção populacional foram oriundos do projeto “Avaliação de Benefício-Custo de Medidas de Controle de Cheias e Despoluição Urbana – Estudo de caso da Bacia do Rio Barigüi” (PROJETO BARIGUI, 2003), disponível no Departamento de Hidráulica e Saneamento da UFPR. Este projeto foi realizado com o objetivo de avaliar o impacto das obras de saneamento que a Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR pretende executar na bacia. O projeto prevê a instalação de três novas estações de tratamento de esgoto, ampliação da capacidade de duas estações já em funcionamento, desativação de RALFs antigos e ampliação da rede coletora de esgoto, entre 2005 e 2020.

A base cartográfica, as informações cadastrais e de captação de água, os dados de monitoramento de estações hidrológicas e de qualidade da água provieram do Sistema de Informações Geográficas para Gestão de Recursos Hídricos da Superintendência de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - SUDERHSA. A base cartográfica é referente ao ano de 2000, está na projeção UTM fuso 22S,

DATUM SAD-69, em escala 1:10.000 e formato shape.

Os dados levantados foram ajustados para a estrutura proposta pelo modelo e carregados no banco de dados ACCESS da Microsoft.

A partir da avaliação dos dados disponíveis foram identificados 13 eventos (passados ou futuros) relevantes para a qualidade da água nesta bacia hidrográfica, listados na Tabela 1. Para cada um destes eventos foi realizada uma simulação, utilizando o QUAL2E em regime permanente, para o parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO₅.

A DBO₅ avalia, indiretamente, através do consumo de oxigênio pelos microorganismos que se alimentam de matéria orgânica, a quantidade de matéria orgânica biodegradável presente numa amostra de água (SUDERHSA, 1997). Está relacionada à presença de efluentes domésticos e industriais num corpo d'água.

Tabela 1 – Eventos relevantes da bacia do rio Barigüi entre 1996 e 2020.

Event	Descrição	Data
1	Aumento da População	1996
2	Instalação de Novas Indústrias	1997
3	Substituição de RALFs / Instalação da ETE Santa Quitéria / Novas Captações	1998
4	Eliminação de Lançamentos de Esgoto In Natura	1999
5	Aumento da População / Nova Captação	2000
6	Nova Captação SANEPAR	2002
7	Eliminação de RALFs / Instalação da ETE CIC Xisto / Novas captações	2003
8	Fechamento da Indústria White Martins / Encerramento de Captação / Aumento de População	2004
9	Chuva	27/4/2004
10	Implantação das ETES denominadas Tranqueira, Tabão e Tamandaré	2005
11	Aumento da População	2010
12	Aumento da População / Ampliação da Rede Coletora de Esgoto	2015
13	Aumento da população	2020

Para compor a matriz de poluição para a aplicação do QUAL2E foram

extraídas do banco de dados, para cada data, as concentrações do parâmetro DBO₅, das cargas difusas para a vazão média de longo período (Q_{mlp}), das cargas pontuais de lançamento de efluentes, e as retiradas de água. Para o evento 11, que projeta a população para o ano de 2010, foram realizadas duas simulações com cenários alternativos, uma considerando que as obras de saneamento previstas pela SANEPAR serão realizadas e a outra considerando que essas obras não serão realizadas. Todos os resultados das simulações foram carregados no banco de dados.

Foram criadas uma série de mapas temáticos no ArcView 3.2, um para cada simulação e alguns para comparação entre os resultados de duas simulações. Em cada mapa foram carregados os dados relativos à simulação, evento, trecho do rio (com informação da qualidade e vazões), e os dados relativos à população através das micro-bacias. Foram carregadas também todas as fontes pontuais, classificadas em indústria, comércio e serviço, aterros sanitários, lançamento de esgoto *in natura*, estações de tratamento de esgoto, e captações.

A tabela 2 mostra as classes definidas para apresentar as micro-bacias em função da população não atendida por saneamento básico, em número de habitantes.

Tabela 2 – População não atendida por sistema de esgotamento sanitário (habitantes).

	< 1.000
	1.001 a 5.000
	5.001 a 10.000
	> 10.000

Os trechos do rio são apresentados pela qualidade da água, classificados pelo limite de concentração do parâmetro DBO₅, determinado pela resolução CONAMA 20/86 (vigente em 2004) para cada classe, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Concentração de DBO₅ por classe da resolução CONAMA 20/86.

Cor	Concentração DBO ₅ (mg/l)	Classe do rio
	< 3	1
	3 – 5	2
	5- 10	3
	> 10	4

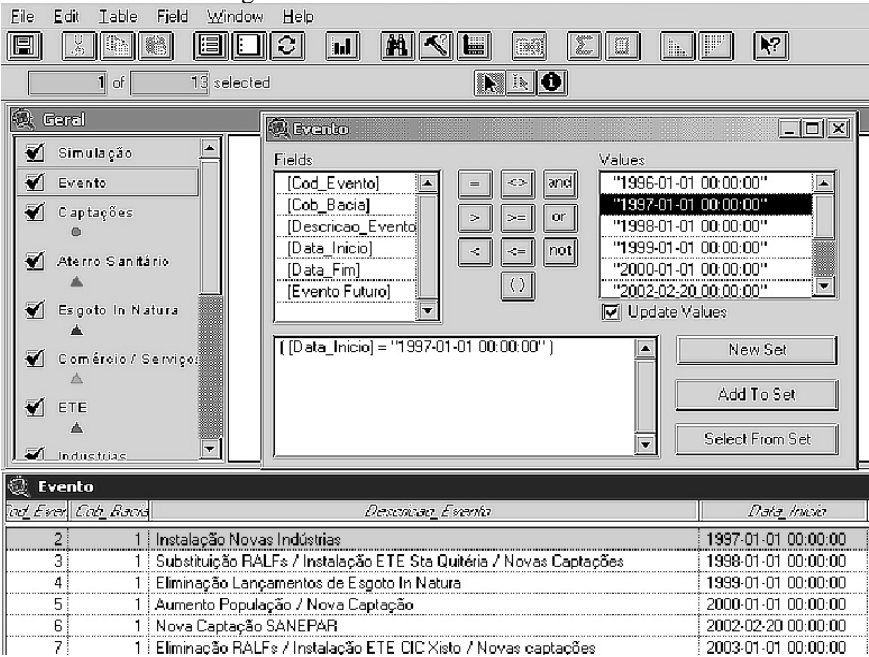
No estado do Paraná, o órgão responsável pela gestão dos recursos hídricos é quem determina o enquadramento dos rios. O rio Barigüi e seus afluentes pertencem à *classe* 2, com exceção do trecho a jusante do parque Barigüi que pertence à *classe* 3 (SUREHMA, 1992).

7. RESULTADOS DAS CONSULTAS AO MODELO

O modelo espaço-temporal desenvolvido utiliza o evento como base para a organização das informações temporais e o relaciona aos elementos envolvidos, no caso, as fontes de poluição da bacia hidrográfica e os resultados das simulações da qualidade da água. A partir da consulta a um determinado evento é possível saber que mudanças ocorreram na bacia naquela data, e que impactos essa mudança causou. A seguir são apresentados alguns exemplos das consultas realizadas.

Para exemplificar a possibilidade de realizar consultas baseadas em eventos, a Figura 3 apresenta uma tela do ArcView 3.2 mostrando uma consulta a Entidade *Evento* (tela no centro da figura) para identificar que eventos ocorreram no ano de 1997 (data de início = 01/01/1997).

Figura 3 – Consulta Baseada no Evento.

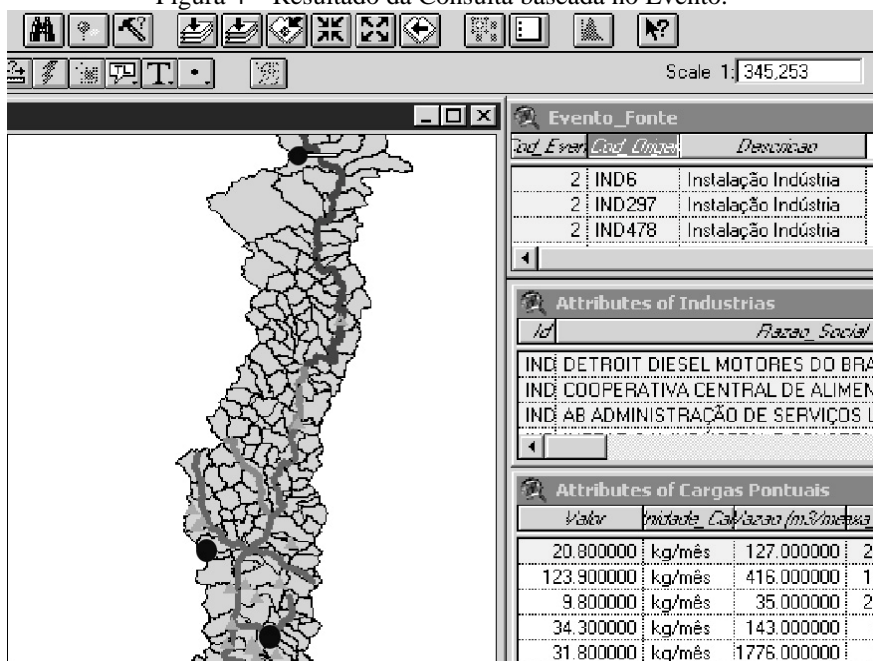


O resultado da consulta indica, pela notação específica da mudança implementada no modelo, através do atributo *Descrição_Evento*, que nesse ano houve a instalação de novas indústrias na bacia, conforme pode ser observado na linha em destaque (primeira linha) na tabela *Evento* na Figura 3.

A Figura 4 apresenta uma tela do ArcView 3.2 onde se pode observar que com

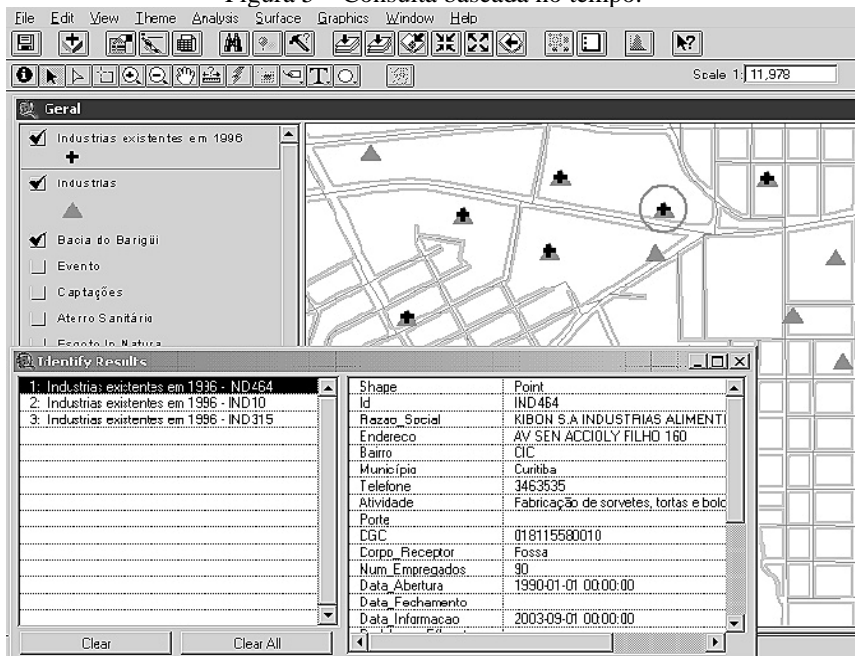
base no relacionamento entre o evento e as fontes poluidoras, entidade *Evento Fonte*, pode-se identificar que as indústrias instaladas em 1997, representadas pelos círculos pretos no mapa, foram a Detroit Diesel, a Cooperativa Central de Alimentos e a AB Administradora de Serviços. É possível consultar as informações relativas a qualquer uma delas, por exemplo, os valores relativos à carga de DBO gerada pela indústria AB Administração de Serviços, que é de 20,80 kg/mês, como se pode verificar na primeira linha na tabela *Cargas Pontuais* na Figura 4.

Figura 4 – Resultado da Consulta baseada no Evento.



O modelo possibilita também realizar consultas baseadas no tempo, ou seja, determinar em uma data específica, qual a situação de uma região ou entidade. É possível responder perguntas do tipo “Quais as indústrias existentes na bacia em 1996?” A Figura 5 mostra uma tela do ArcView 3.2 que apresenta o resultado da consulta para identificar quais as indústrias instaladas na bacia em 1996. Todas as indústrias que existiram em quaisquer datas na bacia estão representadas na figura 5 pelos triângulos e as indústrias que existiam em 1996 estão representadas pelo símbolo pontual (+). A partir da interface do SIG é possível consultar os dados de uma entidade específica naquela data. Por exemplo, o quadro no canto inferior da Figura 5, apresenta as informações cadastrais da indústria Kibon, que está destacada pelo círculo na figura.

Figura 5 – Consulta baseada no tempo.

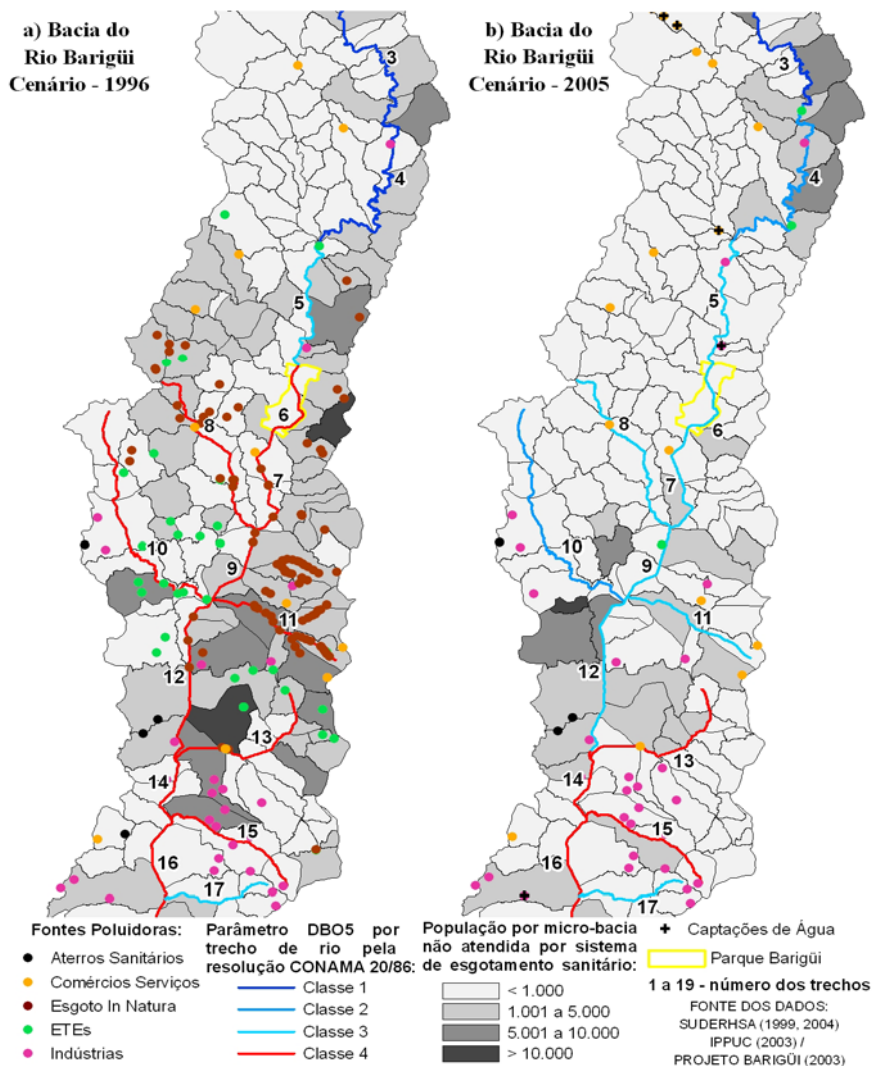


A Figura 6 apresenta dois mapas da bacia do rio Barigüi, o primeiro mapa (a) apresenta a situação relativa aos elementos que influenciam a qualidade da água, considerados neste trabalho, para o ano de 1996 e o segundo mapa (b) a situação para o ano de 2005.

Em ambos os mapas a qualidade da água é apresentada para o parâmetro DBO₅ por trecho de rio, pelas classes da resolução CONAMA 20/86, listadas na Tabela 3. As fontes de poluição pontual estão representadas por círculos. A poluição difusa considerada é a gerada pelos lançamentos de esgoto não tratado cujos pontos de lançamento não são conhecidos. Está representada nos mapas pela população não atendida por esgotamento sanitário nas micro-bacias, conforme as classes apresentadas na Tabela 2.

Analisando-se a Figura 6, é possível identificar a influência das fontes de poluição sobre a qualidade da água na bacia do Barigüi.

Figura 6 – Comparação da Qualidade da Água entre 1996 e 2005.



Pode-se identificar, por exemplo, que a eliminação dos pontos de lançamento de esgoto *in natura*, representadas na Figura 6a pelos círculos em marrom, melhorou a qualidade da água dos trechos 8 e 11, que passaram da classe 4 em

1996, trechos em vermelho na Figura 6a, para a classe 3 em 2005, trechos em azul claro na Figura 6b.

Da mesma forma, a desativação das ETES que operavam com RALFs, que possuem baixa eficiência de tratamento do esgoto, representadas na Figura 6a pelos círculos em verde, alterou significativamente a qualidade da água do trecho 10, que passou da classe 4 em 1996, para a classe 2 em 2005.

Observando-se as micro-bacias que circundam os trechos 3 e 4 pode-se verificar a influência da poluição difusa gerada pela população que não é atendida por tratamento de esgoto nas micro-bacias. Nota-se que a qualidade da água do trecho 4 piorou, passando da classe 1 em 1996 para a classe 2 em 2005, devido ao aumento da população não atendida por sistema de tratamento de esgoto. Na Figura 6a havia apenas uma micro-bacia próxima a esses trechos na faixa de 5.001 a 10.000 habitantes não atendidos, já na Figura 6b, são 3 micro-bacias nessa classe, além de muitas outras na faixa de 1.001 a 5.000 habitantes não atendidos.

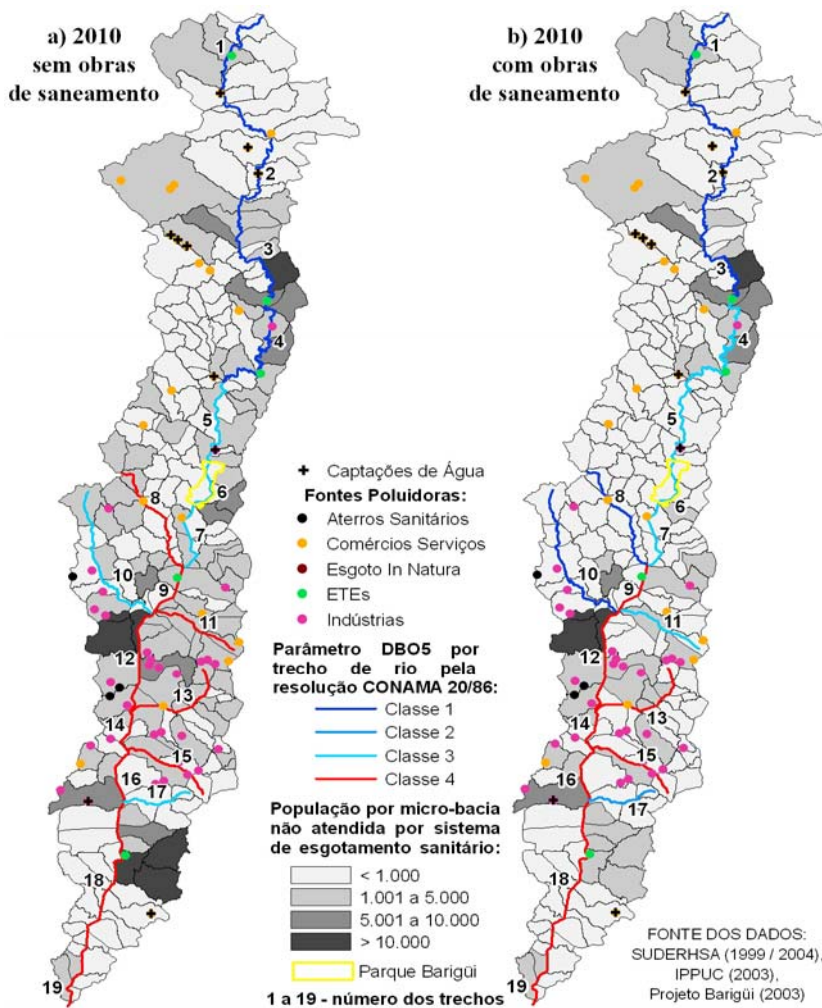
Por outro lado, os trechos 6 e 7 tiveram a qualidade melhorada, passando da classe 4 em 1996 para a classe 3 em 2005, justamente pela diminuição da poluição difusa causada por esgoto doméstico, em função da instalação de novas estações de tratamento de esgoto, nos trechos 4 e 9. Na Figura 6a, identificam-se várias micro-bacias próximas a esses trechos, na faixa de 1.001 a 5.000 e uma micro-bacia com mais de 10.000 habitantes não atendidos por sistema de esgotamento sanitário, enquanto na Figura 6b a maioria das micro-bacias apresenta menos que 1.000 habitantes nessa situação. Verifica-se também que o trecho 12, teve a qualidade melhorada em consequência da desativação dos RALFs (ETES), que possuem pouca eficiência no tratamento de esgoto.

Pela análise dos mapas identifica-se que não houve alteração significativa das indústrias existentes em 1996 e em 2005. Pode-se avaliar também que os trechos com grande concentração de indústrias, 13 e 15, não apresentaram melhora na qualidade da água em função das obras de saneamento que foram realizadas na bacia, pois recebem os despejos industriais.

Através dos mapas apresentados, por comparação, é possível ter conhecimento não só das mudanças ocorridas na qualidade da água, mas também de quais fatores influenciaram essas mudanças, sendo possível dessa forma responder à questão “Houve alteração na qualidade da água? Por quê?”. Utilizando o SIG é possível consultar exatamente quais foram as alterações ocorridas entre as duas datas, identificando as fontes de poluição existentes neste período e qual a carga gerada.

Uma função importante da análise em uma aplicação espaço-temporal em SIG é simular situações futuras e realidades alternativas. O exemplo apresentado na Figura 7 mostra a simulação da qualidade da água para o ano de 2010, considerando o aumento populacional previsto no Projeto Barigüi. O cenário da Figura 7a destaca como ficará a qualidade da água, com relação ao parâmetro DBO₅, se não forem realizadas as obras de saneamento previstas. A Figura 7b apresenta a provável situação, caso as obras sejam realizadas.

Figura 7 – Simulação de Realidades Alternativas para o Ano de 2010.



Nota-se que o trecho 4 terá sua qualidade piorada caso as obras sejam realizadas pois a ETE ali instalada receberá o esgoto coletado das micro-bacias a jusante do trecho. Comparando-se os mapas observa-se que a realização dessas obras é de fundamental importância para a qualidade da água na bacia.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este texto apresentou o modelo de dados espaço-temporal em SIG para análise da qualidade da água em uma bacia hidrográfica desenvolvido por SOUZA (2004). Este modelo considera que a qualidade da água de um rio é alterada pelos eventos relativos aos agentes que interferem na qualidade da água, as fontes poluidoras, captações de água do rio e fenômenos climatológicos.

Com o modelo espaço-temporal proposto é possível armazenar o resultado de simulações da qualidade da água em uma bacia hidrográfica em diferentes datas, relacionando as simulações aos eventos e às fontes de poluição, o que permite visualizar o cenário existente em um determinado momento. Dessa forma é possível analisar as alterações ocorridas na qualidade da água ao longo do tempo e identificar quais foram as causas das mudanças. O modelo prevê a existência de realidades alternativas, e possibilita a simulação de cenários passados e futuros e a comparação entre eles.

A metodologia empregada no desenvolvimento do modelo pode ser aplicada para outras bacias hidrográficas, pois as peculiaridades das diferentes regiões não alteram a modelagem do sistema. As diferenças entre as bacias são tratadas no modelo de dados como atributos das entidades, dessa forma as decisões não se alteram.

Durante o desenvolvimento do trabalho, na implementação do modelo para a bacia do rio Barigüi, constataram-se inconsistências nos dados disponíveis, tanto na base cartográfica quanto nos dados tabulares. A maioria das inconsistências verificadas diz respeito à localização e características das entidades geográficas. Foi possível realizar a correção de muitos erros significativos, dentre eles, a correta localização das nascentes do rio Barigüi na base cartográfica da SUDERHSA, que é a base de dados oficial de recursos hídricos do Estado do Paraná.

Também se verificou a inadequação das informações para uma aplicação espaço-temporal. Embora tenha sido possível obter uma grande quantidade de dados cadastrais, as informações relativas à dimensão temporal (datas) são poucas e não foi possível compor uma matriz de dados para realizar análises em intervalos menores, mensais ou trimestrais, por exemplo.

Os resultados obtidos permitiram constatar que o uso de um Sistema de Informações Geográficas para o conhecimento e avaliação dos impactos causados pelas atividades humanas na qualidade da água, em uma bacia hidrográfica, ao longo do tempo, é uma ferramenta útil para o gerenciamento dos recursos hídricos. Através das facilidades do SIG, é possível a apresentação dos dados em forma de mapas e consultas que facilitam o entendimento das variáveis relacionadas à qualidade da água e sua dinâmica ao longo do tempo, fornecendo subsídios para o gerenciamento dos recursos hídricos. Os mapas temáticos de qualidade da água gerados pelo trabalho, para as diferentes situações nos períodos estudados, fornecem subsídios para a definição de ações a serem executadas a médio e longo prazo, a fim de melhorar a qualidade da água na bacia do Barigüi. É importante

destacar que o presente trabalho não teve por objetivo constituir uma base definitiva de dados para a bacia do rio Barigüi, a base foi utilizada apenas para demonstrar a eficiência do modelo através da sua implementação.

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se a programação de interfaces para a geração e carga da matriz de poluição para o QUAL2E, de modo a permitir a execução a partir da interface do ArcView. Recomenda-se também a programação de interfaces para a realização das consultas e análises espaço-temporais no ArcView, para facilitar o uso do modelo por técnicos das diversas áreas relacionadas à gestão dos recursos hídricos. Para melhorar a apresentação dos resultados das consultas e análises espaço-temporais sugere-se o estudo e proposição de métodos de animação de mapas em SIG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL & ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos*. 2 ed. Brasília, 2001. 328 p.
- BEDÁRD, Y. Principles of Spatial Database Analysis and Design. In: LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.) *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues*. New York: J. Wiley & Sons. 2. ed. V. 1, 1999. p. 413-424.
- BURROUGH, P.A. Environmental modeling with geographical information systems. In: FOURTH NATIONAL CONFERENCE ON GIS RESEARCH, 4., 1997, Inglaterra. KEMP, Z. *Innovations in GIS 4*. Inglaterra: Taylor & Francis, 1997. pg. 143-153.
- COUCLELIS H. Space, Time, Geography. In: LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.) *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues*. New York: J. Wiley & Sons. 2. ed. V. 1, 1999. p. 29-38.
- HEM, J. D. *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. Washington, DC: US Geological Survey Water-Supply, 3ª ed., 1989.
- KORTH, H. F. e SILBERSCHATZ, A. Sistema de Banco de dados. 2ª ed; tradução Mauricio Heihachiro Galvan Abe ; revisão técnica Prof. Waldemar W. Setzer. São Paulo: MAKROBooks ed, 1995.
- LIMA, E. B. N. R. *Modelação Integrada para gestão da qualidade da água na bacia do rio Cuiabá*. Rio de Janeiro, 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MENESES FILHO, A. de S.; TUCCI, C. E. M. Impacto da urbanização na produção anual de cargas poluentes, com incerteza. In: 6º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA. 6, 2003, Cabo Verde. Anais, 2003, p. 889-901.

- Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Resolução CONAMA N.º 20, de 18 de junho de 1986. Diário Oficial da União. Brasília: Imprensa Nacional, 1986.
- PEUQUET, D.J.; DUAN, N. An event-based spatio-temporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographic data. *International Journal of Geographic Information System* 9: 2-24. 1995.
- PEUQUET, D.J. Time in GIS and Geographical Databases. In: LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.) *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues*. New York: J. Wiley & Sons. 2. ed. V. 2, 1999. p.91-103.
- PROJETO BARIGUI., *Avaliação do custo-benefício de medidas de controle de cheias e despoluição urbana: estudo de caso da bacia do Rio Barigüi*. Curitiba: UFPR-DHS, 2003. 154 p. Relatório 1 – parcial.
- SOUZA, J. D. *Modelo Espaço-Temporal em SIG para Análise de Qualidade da Água em uma Bacia Hidrográfica*. Curitiba, 2004. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Geociências, Universidade Federal do Paraná.
- SUDERHSA. *Qualidade da Água dos Rios Paranaenses*. Curitiba, 1997.
- SUDERHSA. *Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu*. CD - Relatório final, 1999.
- TUNDISI, J. G. *Água no século XXI: Enfrentando a escassez*. São Carlos: RiMa, Iie, 2003. 248p.
- WORBOYS, M. F. **GIS: A Computing Perspective**. London: Taylor & Francis. 1995.

(Recebido em setembro / 2008. Aceito em maio / 2009)