

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

*Jaqueline Dorneles de Souza<sup>1</sup>; Dr.<sup>a</sup> Claudia Robbi Sluter<sup>2</sup> & Dr.<sup>a</sup> Maria Cristina Borba Braga<sup>3</sup>*

**RESUMO** --- Os Sistemas de Informações Geográficas são utilizados para auxiliar na gestão do meio ambiente, sendo uma de suas funções gerenciar informações relativas à disponibilidade e condições dos recursos naturais. Embora a disponibilidade e condição desses recursos se alterem, devido a influência de diversos fatores, de um local para outro e ao longo do tempo, os modelos de dados geralmente empregados não possibilitam acompanhar a dinâmica das mudanças ocorridas. Através dessa pesquisa foi desenvolvido um modelo de dados espaço-temporal em SIG que permite 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. O modelo desenvolvido utiliza o tempo como base para organizar os dados espaciais e registra o momento e o local das mudanças ocorridas, possibilitando a representação de eventos passados, presentes e futuros. Para testar sua eficiência, o modelo foi implementado no SIG ArcView 3.2, utilizando-se dados de 1996 a 2020 para o parâmetro DBO5, para a bacia do Rio Barigüi, localizada na Região Metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná, Brasil.

**ABSTRACT** --- The Geographic Information Systems are used to assist the environmental management, and one of its functions is to manager information about the availability and condition of the natural resources. Although the availability and condition of this resources change, due to the influence of many factors, from one place to another and throughout the time, the data models commonly used does not allow understanding the dynamic of changes. This research developed a space-time data model for GIS to identify the changes occurred in the quality of water in a basin and relates them to the events and sources of pollution that has caused it. The developed model uses time to organize spatial data and register the moment and place of changes, making possible the representation of passed, current and future events. The model was implemented as proof of concept in the GIS ArcView 3.2, using data of the water quality parameter DBO5 from 1996 to 2020, for Barigüi River Basin, located at the Metropolitan Region of Curitiba, Paraná State, Brazil.

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

---

<sup>1</sup> Mestre em Ciências Geodésicas – Área de Tecnologia da Informação e Geoprocessamento/SUDERHSA, Rua Santo Antonio nº239, CEP: 80230-120. Curitiba. E-mail: jaquelinesouza@suderhsa.pr.gov.br

<sup>2</sup> Professora da UFPR/Departamento de Geomática, Centro Politécnico - sala P18, Bloco VI, Jardim das Américas, CEP 81531-900. Curitiba. E-mail: robbi@ufpr.br

<sup>3</sup> Professora da UFPR/Departamento de Hidráulica e Saneamento, Centro Politécnico, Jardim das Américas, CEP 81531-900. Curitiba. E-mail: crisbraga@avalon.sul.com.br

## 1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são amplamente utilizados para inventário, análise, entendimento, modelagem e gerenciamento do meio ambiente, Burrough (1997). A disponibilidade dos recursos naturais se altera em função das atividades humanas e varia ao longo do tempo, Burrough (1998). Portanto, o planejamento e formulação de estratégias de desenvolvimento sócio-econômico devem 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 termoelétricas, 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. 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, Couclelis (1999). Os SIGs têm, historicamente, representado o mundo como se ele existisse somente no presente, enfatizando sua representação espacial, Peuquet (1995); Worboys (1995). As informações contidas em um bando 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). Segundo Bédard (1999) um banco de dados espacial é qualquer conjunto de dados que descreva a semântica e as propriedades espaciais de um fenômeno do mundo real. Um modelo é uma representação de algum fenômeno que deve ser entendido, lembrado, comunicado e testado. Para qualquer banco de dados, o modelo de dados determina o que pode ser feito facilmente, com dificuldade ou o que não

pode ser feito, uma vez que o sistema tenha sido implementado. 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-temporais 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. Esta bacia apresenta uma matriz de poluição complexa envolvendo problemas relativos a atividades econômicas e densidade populacional. Para compor a base de dados foram utilizados dados de população de 1996 a 2020, dados de indústrias, estabelecimentos comerciais e de serviços, estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários e 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.

Através do modelo espaço-temporal desenvolvido é possível armazenar o resultado de várias simulações para uma bacia hidrográfica, ligando cada simulação a um evento específico e identificando qual o cenário válido naquele momento. Dessa forma é possível analisar as alterações ocorridas na qualidade da água ao longo do tempo e relacioná-las aos eventos que as causaram e as fontes geradoras da poluição. O modelo suporta a existência de realidades alternativas, permitindo a simulação de cenários passados e futuros e a comparação entre eles. Este texto apresenta o modelo de dados de forma sucinta..

## **2. QUALIDADE DA ÁGUA E FONTES DE POLUIÇÃO**

Durante o ciclo hidrológico, a água sofre alterações em sua qualidade. Isso ocorre nas condições naturais, em razão das inter-relações dos componentes do sistema do meio ambiente e quando os recursos hídricos são influenciados por outros fatores, como o uso para suprimento das demandas dos núcleos urbanos, das indústrias, da agricultura e das alterações do solo, urbano e rural, ANEEL & ANA (2001). Quando as atividades humanas causam diminuição na qualidade da água diz-se que está poluída, Hem (1989).

Os recursos hídricos têm capacidade de diluir e assimilar esgotos e resíduos mediante processos físicos, químicos e bacteriológicos, que proporcionam a autodepuração. Essa capacidade,

no entanto, é limitada em face das características hidráulicas, morfológicas, climatológicas e biológicas, segundo ANEEL & ANA (2001). 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.

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 restritos 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, segundo Hem (1989). No Brasil, a resolução CONAMA nº 20/86 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 é 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 estar 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, segundo Hem (1989). A Figura 1 ilustra as fontes de poluição.



Fonte: Lima (2001)

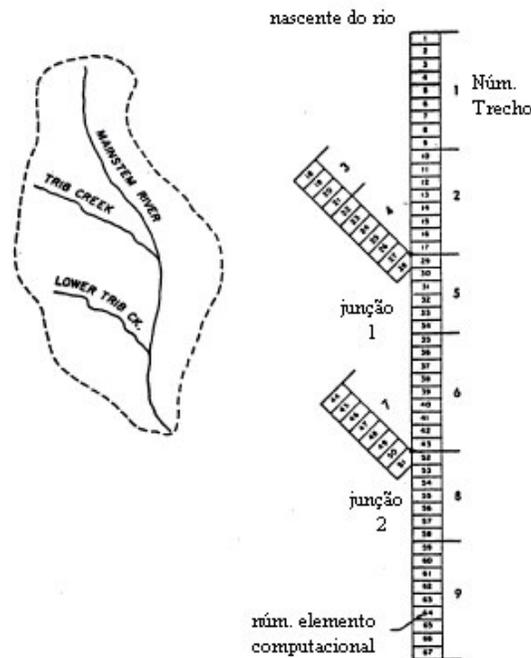
Figura 1 – Fontes de Poluição dos Rios

Algumas origens de fonte difusa de poluição em meio urbano são o lixo orgânico acumulado nas ruas, os resíduos orgânicos de animais, os restos provenientes de construção, as partículas de pneu e de asfalto, as ligações incorretas ou clandestinas de esgoto doméstico na rede de drenagem pluvial, Porto (1995). No meio rural, as origens de fontes difusas de poluição são as práticas agrícolas, e o uso de fertilizantes e pesticidas, Hem (1989).

### 2.1.1 Modelo matemático 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). Conforme demonstrado na Figura 2, no modelo QUAL2E 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 divididos em 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 efluente), e o volume de água retirado do rio pelas captações.



Fonte: Linfield e Barnwel, 1987

Figura 2 – Representação do Rio no Modelo Qual2e

### 3. REPRESENTAÇÃO DE DADOS ESPACIAIS E TEMPORAIS EM SIG

Segundo Couclelis (1999) a maioria das pessoas está familiarizada com o conceito de entidades e fenômenos geográficos, e as propriedades e relações espaço-temporais que os caracterizam. 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.

Ainda segundo o mesmo autor, conforme a natureza da entidade geográfica, os modelos de dados para SIG são baseados em *objetos*, para representar entidades discretas, ou *campo*, para representar entidades contínuas. A representação de uma entidade discreta, por exemplo, prédio, é feita através de estruturas vetoriais cuja localização geográfica pode ser definida individualmente e de forma precisa, por um ou mais pares de coordenadas. Para representar uma entidade contínua, como por exemplo solo, é utilizada a estrutura matricial que consiste no uso de uma malha quadriculada regular, onde a cada célula é associado um código referente à entidade. A localização de uma entidade é definida pela referência direta às células desta malha, que são associadas a uma área na superfície da Terra.

A qualidade da água, que é o objeto deste trabalho, ocorre no rio, que é uma entidade discreta, portanto o modelo de dados utilizado é *objeto*. Outros elementos relacionados como as fontes pontuais de poluição, indústrias, estações de tratamento de esgoto e outras, também são entidades discretas e são representadas na mesma maneira.

Conceitualmente, o objetivo básico de qualquer banco de dados temporal é registrar as mudanças ao longo do tempo. 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, ou a construção de uma estrada. 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 tratadas como repentinas.

Embora seja contínuo, o tempo é convencionalmente discretizado em unidades variáveis ou uniformes, com o objetivo de realizar medidas. Unidades de medida de tempo podem ser segundos, minutos, dias, estações ou outras unidades que forem convenientes, Peuquet (1999). Também é necessário fazer distinção entre o tempo de existência de uma entidade no mundo real, e o tempo de existência desta entidade no sistema de informações, Worboys (1995; Price et al., (1999); Raper

(2000). Outro requisito importante na modelagem de aplicações geográficas é a capacidade de representar versões alternativas da mesma realidade, passado ou futuro, através da representação do tempo *ramificado* ou parcialmente ordenado, Lester (1990); Langran (1993); Worboys (1995); Peuquet (1999), Price et al. (1999); Raper (2000).

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

O diagrama apresentado na Figura 3 mostra as entidades envolvidas na representação espaço-temporal da qualidade da água em uma bacia hidrográfica e o relacionamento 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 neste trabalho é a notação abordada por Korth e Silberschatz (1995) onde as entidades são representadas por retângulos, os relacionamentos entre elas 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 determinada entidade pode existir nenhuma, uma ou várias ocorrências de uma outra entidade. As entidades que são dependentes de outra entidade são representadas por um retângulo com bordas duplas. A generalização ou especialização de uma entidade é representada por um triângulo.

Conforme apresentado no diagrama, a qualidade da água é um atributo do rio, e é definida pela determinação dos valores de uma série de constituintes que são alterados em função de agentes externos, cuja existência se altera entre locais e datas. A área de influência desses agentes é delimitada pela área de drenagem do rio que é a bacia hidrográfica.

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.

As fontes pontuais de poluição consideradas relevantes para este trabalho são as seguintes: indústrias; estações de tratamento de esgoto; aterros sanitários; estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços; lançamentos de esgoto *in natura*.

As fontes difusas de poluição variam de acordo com o uso e ocupação do solo, a quantidade de chuva e a população existente em uma região em um determinado momento. Foram considerados também como fonte de poluição difusa os esgotos domésticos não tratados cujos pontos de lançamento não são conhecidos. Portanto, os elementos considerados para este trabalho são população, uso e ocupação do solo e precipitação anual média.

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 determinado momento. As retiradas de água, denominadas captações, são realizadas por indústrias e outros estabelecimentos cuja existência varia de um local para outro e ao longo do tempo.

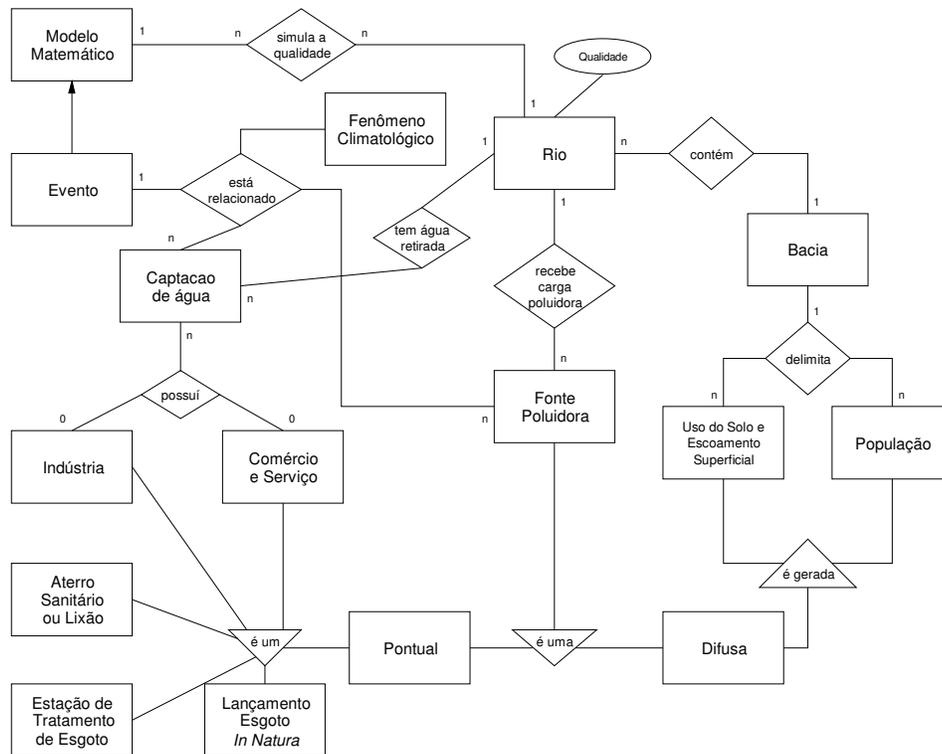


Figura 3 –Diagrama Geral do Modelo de Qualidade da Água

A mudança de um estado da qualidade da água para outro é determinada pelos eventos relacionados aos agentes externos. 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, listados a seguir:

- a) abertura ou fechamento de indústrias, estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços;
- b) implantação ou desativação de aterros sanitários e sistemas de tratamento de esgoto;
- c) início ou fim de lançamento de esgoto *in natura*;
- d) aumento ou diminuição na quantidade de efluentes lançados no rio;
- e) aumento ou diminuição da quantidade de água captada do rio;
- f) alteração no processo de tratamento de efluentes;
- g) alteração significativa no uso do solo ou população;
- h) períodos de chuva ou seca.

A situação da qualidade da água do rio é conhecida através do uso de um modelo matemático, neste caso o QUAL2E, que simula a capacidade de depuração do rio. Quando ocorre um evento, o modelo matemático é aplicado para se conhecer a nova situação de qualidade da água do rio.

## 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 tendo como base os seguintes requisitos:

- a) utilizar os eventos como base para gerenciar as mudanças ocorridas na qualidade da água;
- b) tratar eventos atuais, passados e futuros e permitir a existência de realidades alternativas;
- c) 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;
- d) tratar diferentes vazões por trecho de rio;
- e) determinar a situação da água com o uso do modelo matemático de simulação QUAL2E;
- f) comparar os valores gerados pelo QUAL2E com valores medidos em campo;
- g) 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, por exemplo, temperatura. 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, Figura 4, 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 nova entrada no banco de dados, pela adição de um novo registro de tempo, através do evento, e a este registro é associada uma notação específica das mudanças ocorridas.

A entidade Evento possui a descrição dos eventos que alteraram a qualidade da água na bacia e a informação temporal através da data de ocorrência. 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 *Fonte Evento*, a diversas entidades: fontes pontuais ou difusas de poluição, captações da água ou fenômenos climatológicos.

Os resultados gerados pelo modelo matemático são armazenados por trecho de rio, para cada parâmetro de qualidade simulado, através do relacionamento *Qualidade Simulada*, o que torna possível saber qual o valor de determinado parâmetro para qualquer trecho do rio em qualquer data

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

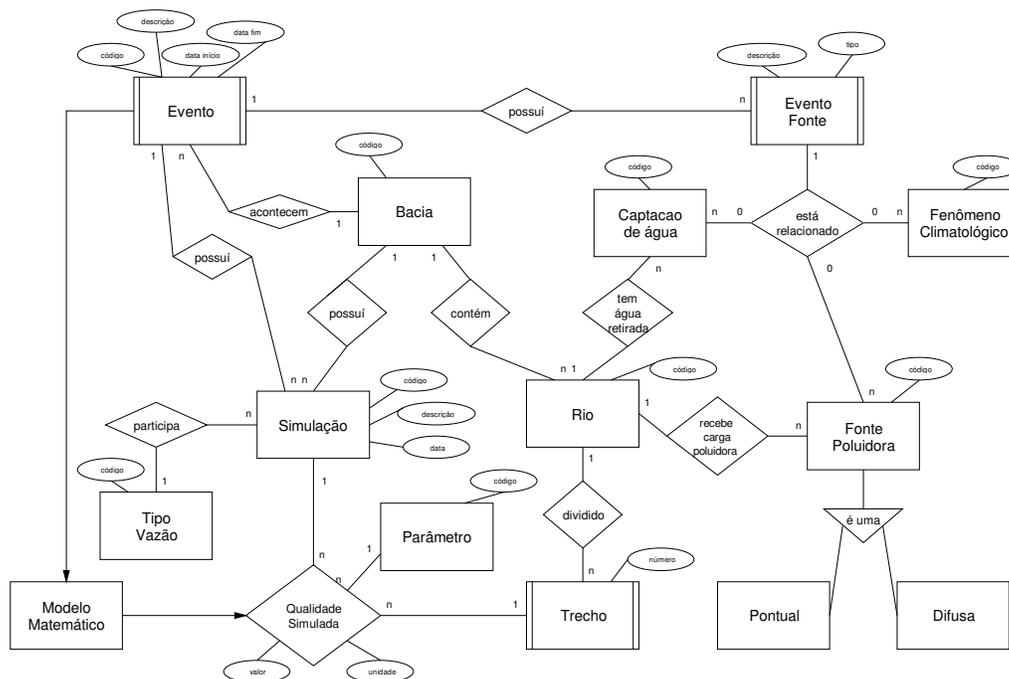


Figura 4 – Diagrama de Eventos

Desta forma, é possível 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 referenciadas 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 sofreu os efeitos do processo de urbanização desordenado, e, como a maioria das bacias brasileiras, encontra 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 prestadores de serviço.

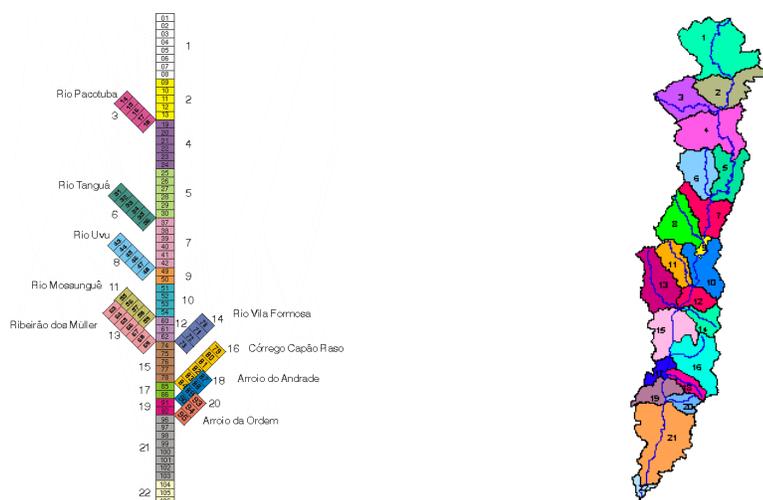
No intuito de compor uma base capaz de mostrar a eficiência do modelo em simular eventos passados, presentes e futuros foram levantados dados de população de 1996, 2000, e projeções para 2005, 2010, 2015 e 2020, dados de indústrias e estabelecimentos comerciais e de serviços, estações

de tratamento de esgoto, aterros sanitários e lançamentos de esgoto *in natura*.

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), que realizou 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 - ETEs e RALFs), condomínios e aterros.

Os dados de calibração do modelo 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”, 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 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 (Reatores Anaeróbicos de leito Fluidizado) antigos e ampliação da rede coletora de esgoto, entre 2005 e 2020.

A Figura 5 apresenta a divisão do rio Barigüi em trechos e sub-bacias, realizada pelo projeto acima mencionado, de acordo com as exigências impostas pelo modelo QUAL2E.



Fonte: Projeto Barigüi (2003)

Figura 5 – Divisão do Rio Barigüi em Trechos e Sub-Bacias

A base cartográfica, informações cadastrais e de captação de água, dados de monitoramento de estações hidrológicas e de qualidade da água foram oriundas do Sistema de Informações Geográficas para Gestão de Recursos Hídricos (SUDERHSA, 2004).

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 bacia, listados no Tabela 1.

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

<b>Evento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Data</b>
1	Aumento População	1996
2	Instalação Novas Indústrias	1997
3	Substituição RALFs / Instalação ETE Sta Quitéria / Novas Captações	1998
4	Eliminação Lançamentos de Esgoto In Natura	1999
5	Aumento População / Nova Captação	2000
6	Nova Captação SANEPAR	2002
7	Eliminação RALFs / Instalação ETE CIC Xisto / Novas captações	2003
8	Fechamento Indústria White Martins / Enc. Captação / Aumento População	2004
9	Chuva	27/4/2004
10	Implantação ETES Tranqueira / Taboão / Tamandaré	2005
11	Aumento População	2010
12	Aumento População / Ampliação Rede Coletora de Esgoto	2015
13	Aumento população	2020

Para cada um destes eventos foi realizada uma simulação, utilizando o QUAL2E em regime permanente, para o parâmetro DBO5. 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 (Qmlp), e das cargas pontuais de lançamento de efluentes, e as retiradas de água. Para o evento 11, foram realizadas duas simulações com cenários alternativos, uma considerando que as obras de saneamento previstas pela SANEPAR serão realizadas e a outra considerando que não serão realizadas. Os resultados de todas as simulações foram carregados no banco de dados.

A DBO5 - Demanda Bioquímica de Oxigênio é um teste que 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 a presença de efluentes domésticos e industriais num corpo d'água.

Foram criadas uma série de vistas no ArcView 3.2, uma para cada simulação, algumas para comparação entre os resultados de duas simulações, e uma vista geral com todos os dados disponíveis no banco de dados. Em cada vista foram carregados os dados relativos à simulação, evento, trecho do rio (c/ 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, de acordo com a legenda apresentada a seguir:

✚ Captações de água superficial

Fontes Poluidoras Pontuais:

- Aterros Sanitários
- Comércios Serviços
- Esgoto In Natura
- ETES
- Indústrias

As micro-bacias foram apresentadas em função da população não atendida por saneamento básico, em número de habitantes, conforme classificação a seguir:

	< 1.000
	1.001 a 5.000
	5.001 a 10.000
	> 10.000

Os trechos do rio são apresentados em função da qualidade da água, classificados pelo limite de concentração do parâmetro DBO5, determinado pela resolução CONAMA 20/86 para cada classe, conforme apresentado a seguir, na tabela 2:

Tabela 2 – Representação da DBO5 por classes

Cor	Concentração DBO5 (mg/l)	Classe do rio
	< 3	1
	3 –5	2
	5- 10	3
	> 10	4

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 do modelo matemático de qualidade da água. Ou seja, a partir da consulta a um determinado evento é possível saber que mudanças ocorreram na bacia naquela data, e que impactos essa mudança causou.

Através de uma consulta ao evento ocorrido em 1997, identifica-se, pela notação específica da mudança implementada no modelo, através da entidade *Evento*, que nesse ano ocorreram a instalação de 3 novas indústrias. A partir do relacionamento *Evento Fonte* (Figura 6), que liga o evento as fontes de poluição, identifica-se as indústrias instaladas em 1997, Detroit Diesel, Cooperativa Central de Alimentos e AB Administradora de Serviços, a localização delas (triângulos amarelos) e possibilita a consulta das informações relativas a qualquer uma delas.

O modelo possibilita demonstrar a evolução de uma entidade ao longo do tempo. No exemplo da Figura 7 pode-se verificar como a população existente em uma micro-bacia evoluiu ao longo do tempo. Para isso pode-se fazer uma consulta tanto pela localização, selecionando-se a micro-bacia no mapa, como pela entidade, fazendo-se uma consulta através de algum identificador da micro-bacia. A resposta do modelo apresenta todos os dados de população existentes para aquela bacia em todas as datas.

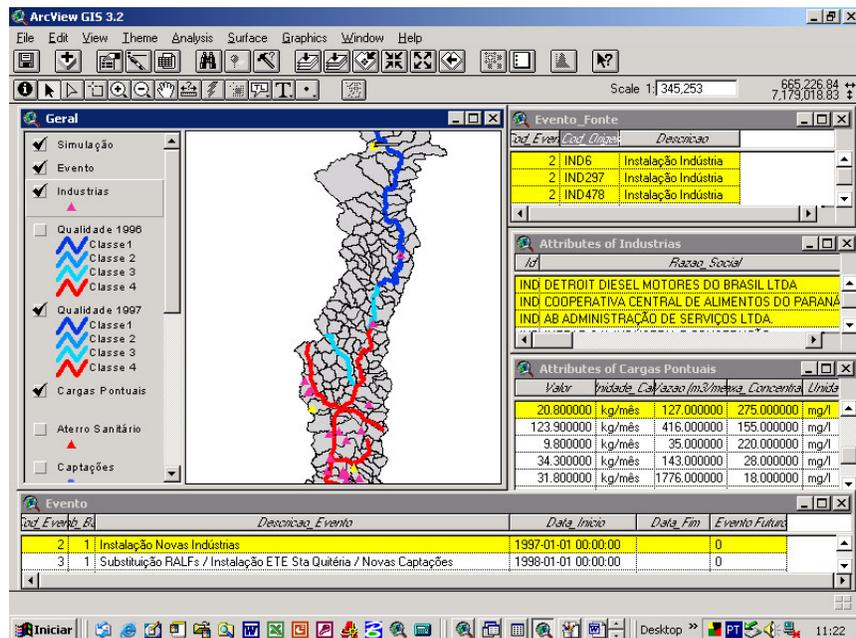


Figura 6 – Informações Obtidas a partir da Consulta Baseada no Evento

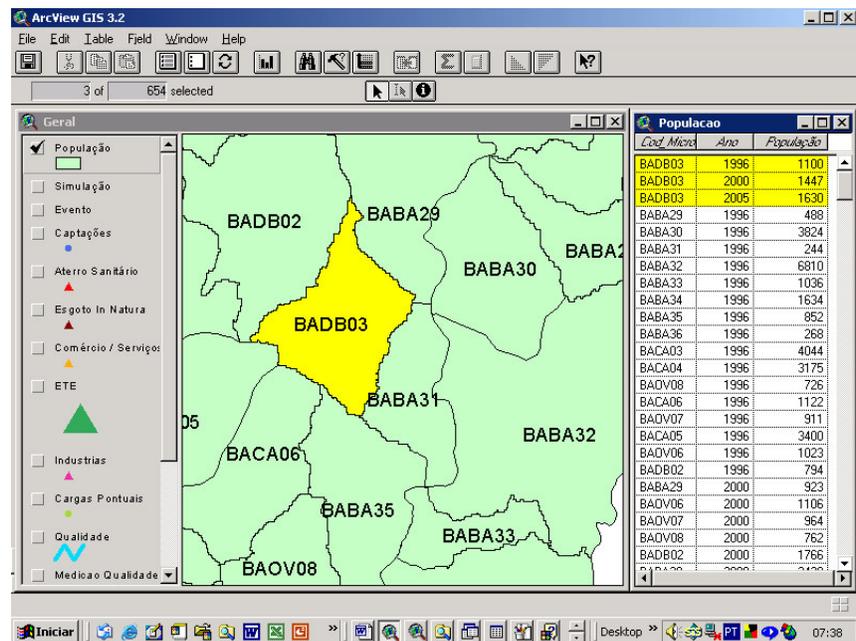


Figura 7 – Evolução de uma Entidade ao longo do tempo

Outro tipo de consulta que o modelo possibilita são as 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?”. Através do relacionamento da entidade *Fonte Poluidora* com a entidade *Indústria* seleciona-se todos os registros dos elementos ativos naquela data, usando os campos data de criação e fechamento. A Figura 8 mostra o resultado da consulta, todas as indústrias que existiram em qualquer data na bacia estão representadas pelos triângulos rosa e as indústrias que existiam em 1996 pelos símbolos (+) pretos. A partir da

interface do SIG é possível consultar os dados de uma entidade específica naquela data. Por exemplo, as informações cadastrais da indústria Kibon destacada pelo círculo amarelo na Figura.

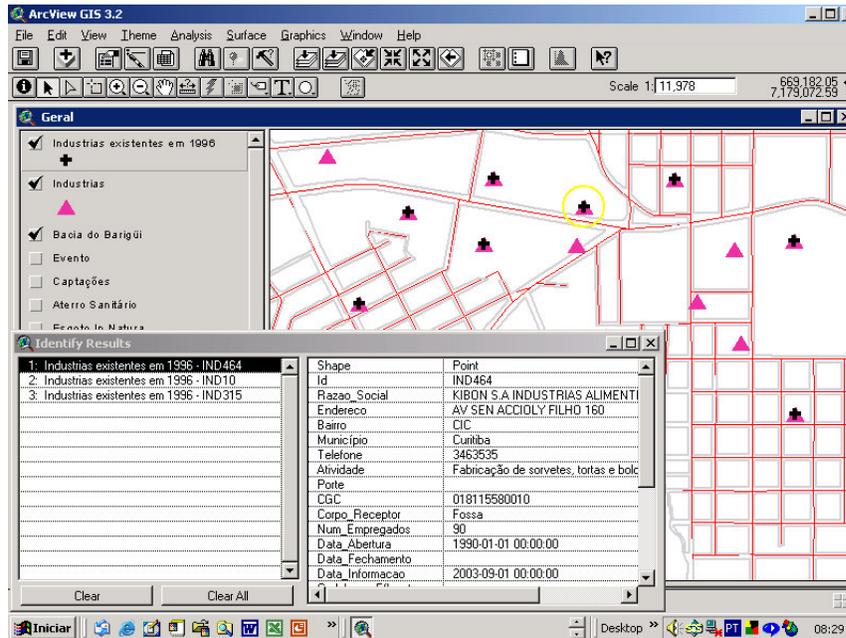


Figura 8 – Consulta Baseada no Tempo

Com base nas entidades e relacionamentos do modelo, a aplicação espaço-temporal em SIG auxilia no entendimento das causas das mudanças ocorridas. A Figura 9 mostra a qualidade da água em relação ao parâmetro DBO5 em 1996 e em 2005.

Analisando-se esta figura é possível identificar a influência das fontes de poluição sobre a qualidade da água na bacia do Barigüi. Pode-se identificar, por exemplo, que a eliminação dos pontos de lançamento de esgoto *in natura* e estações de tratamento de esgoto, existentes em 1996, tiveram impacto na qualidade do trecho 10, que passou da classe 4 para a classe 2. Pode-se verificar também que o trecho 4 sofreu a influência da poluição difusa gerada pela população que não é atendida por tratamento de esgoto, passando da classe 1 para a classe 2. Por outro lado, os trechos 5 e 6 tiveram a qualidade melhorada justamente pela diminuição da poluição difusa causada por esgoto doméstico, em função da instalação de novas estações de tratamento de esgoto. Fica evidente que o trecho 12, teve a qualidade melhorada em consequência da desativação dos RALFs. Pode-se avaliar também que os trechos com grande concentração de indústrias, 15 e 16, não apresentam melhora na qualidade da água em função das obras de saneamento que foram realizadas na bacia.

Através dos mapas apresentados 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 a questão “Houve alteração na qualidade da água? Porque?”. Através do 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 por elas.

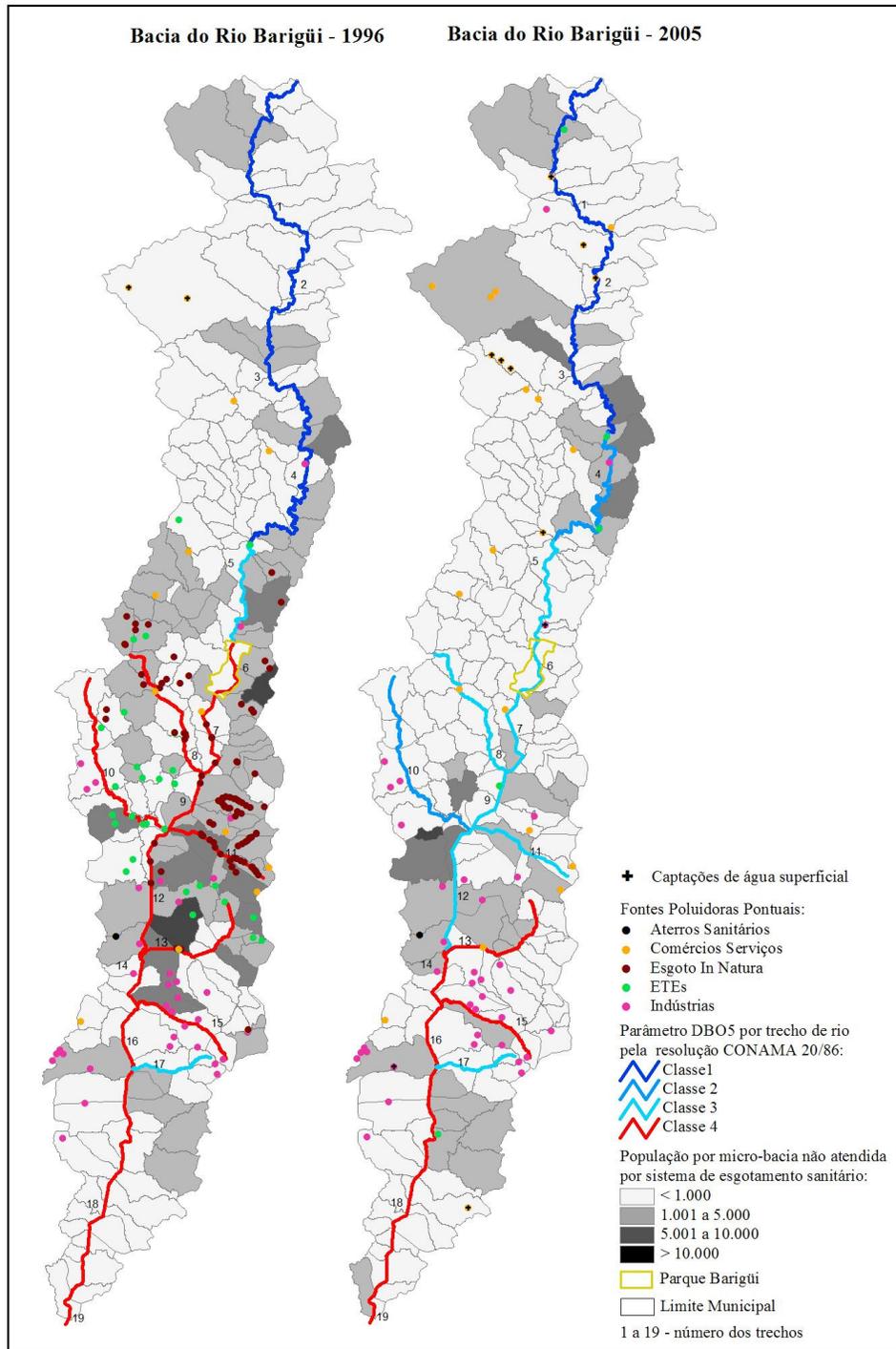


Figura 9 – Comparação da Qualidade da Água e Agentes Envolvidos entre 1996 e 2005

O modelo possibilita também a representação de situações futuras e realidades alternativas. O exemplo apresentado na Figura 10 mostra a simulação da qualidade da água para o ano de 2010, considerando o aumento populacional previsto no Projeto Barigüi. O cenário da Figura 10a mostra como ficará a qualidade da água, para o parâmetro DBO5, se não forem realizadas as obras de saneamento previstas. A Figura 10b apresenta a provável situação, caso as obras sejam realizadas.

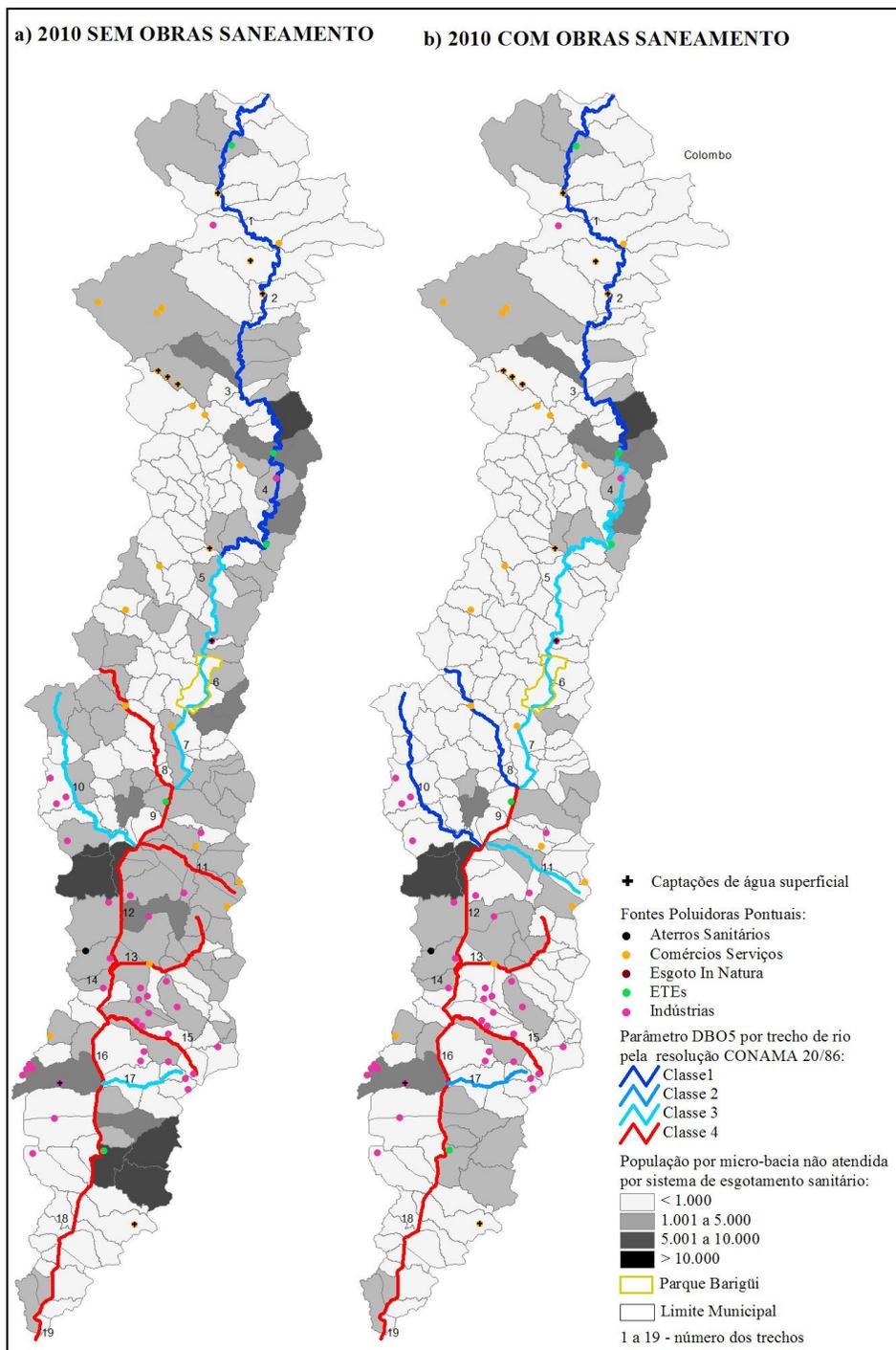


Figura 10 – Simulação de Realidades Alternativas para o Ano de 2010

## 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 é alterada pelos eventos relativos as fontes de poluição pontuais e difusas, como a instalação de uma indústria ou o aumento da população, e pela alteração na quantidade da água do

rio provocada pelas retiradas de água e eventos climatológicos. Foi adaptado do Modelo ESTDM, proposto por Peuquet e Duan (1995) e baseia-se no tempo para organizar as informações espaciais, registrando quando e onde ocorreram mudanças através de uma notação específica no evento. Utiliza um modelo matemático de qualidade da água, o QUAL2E, para simular o impacto das fontes poluidoras na qualidade da água.

Com o modelo espaço-temporal é possível armazenar o resultado de simulações da qualidade da água em uma bacia hidrográfica em diferentes datas, relacionando as simulações aos eventos e as 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 suporta a existência de realidades alternativas, e permite 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 bacias 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.

Foi feita a implementação do modelo espaço-temporal para a bacia hidrográfica do rio Barigüi, localizado na Região Metropolitana de Curitiba, no Estado do Paraná, Brasil. Para demonstrar a eficiência do modelo em simular eventos passados, presentes e futuros utilizou-se informações de indústrias, estabelecimentos comerciais e de serviços, estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários, pontos de lançamentos de esgoto *in natura*, e dados populacionais oriundos de vários projetos. A base composta abrangeu dados de 1996 a 2020, e foi implementada utilizando-se o ACCESS e o SIG ArcView 3.2.

Durante o desenvolvimento do trabalho constatou-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 insuficientes para análises temporais.

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. Pois, 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 no ArcView para a geração e carga da matriz de poluição para o QUAL2E, e para a realização das consultas e análises espaço-temporais, para facilitar o uso do modelo por técnicos das diversas áreas relacionadas à gestão dos recursos hídricos.

## BIBLIOGRAFIA

- ANEEL & ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2001). *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos*. 2 ed. Brasília, 328 p.
- BEDÁRD, Y (1999). “*Principles of Spatial Database Analysis and Design*”, In *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues*. Org. por LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.), Wiley & Sons. 2. ed. V. 1, New York, pp. p. 413-424.
- BURROUGH, P.A. (1997). “*Environmental modeling with geographical information systems.*” In *Innovations in GIS 4 - Fourth National Conference On Gis Research*, Inglaterra, 1997, Taylor & Francis, KEMP, Z., Inglaterra, pp. 143-153.
- BURROUGH, P.A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford university Press. 1. ed, reimpressão com correções, NewYork.
- COUCLELIS H. (1999). *Space, Time, Geography In Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues*. Org. por LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.), Wiley & Sons. 2. ed. V. 1, New York, pp. 29-38.
- HEM, J. D. (1989). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. US Geological Survey Water-Supply, 3<sup>a</sup> ed., Washington-DC .
- KORTH, H. F. e SILBERSCHATZ, A. (1995). *Sistema de Banco de dados*. 2<sup>a</sup> ed; tradução Mauricio Heihachiro Galvan Abe; revisão técnica Prof. Waldemar W. Setzer, MAKROBooks ed, São Paulo.
- LANGRAN, G. (1993). *One GIS, many realities*. GIS 93, Vancouver.
- LESTER, M. (1990). *Tracking the temporal polygon: a conceptual model of multidimensional time for geographic information system*. Presented at Temporal Workshop, Maine, 1990.

LIMA, E. B. N. R. (2001). *Modelagem Integrada para gestão da qualidade da água na bacia do rio Cuiabá*. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro.

LINFIELD, C. B. e BARNWEL JR, T.O. (1987). *The enhanced stream water quality model qual2e and qual2e-uncas: documentation and user manual*. EPA, Giorgia- U.S

PEUQUET, D.J.; DUAN, N. (1995). *An event-based spatio-temporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographic data*. International Journal of Geographic Information System 9, pp. 2-24.

PEUQUET, D.J. (1999). “*Time in GIS and Geographical Databases*”. In *Geographical Information Systems: Principles and Technical Issues*. Org. por LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (eds.), Wiley & Sons. 2. ed. V. 1, New York, pp. 91-103.

PORTO, M. F. A. (1995). “*Aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas.*” In *Dreanagem urbana*. Org. por Tucci, C. E., M. Porto, R. L. E Barros, M. T. (ed). ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS.

PRICE, R.; SRINIVASAN, B.; RAMAMOHANARAO, K. (199). *Extending the Unified Modeling Language to Support Spatiotemporal Applications*. Asia Technology of object Oriented Languages and Systems, pp. 163-174.

PROJETO BARIGUI (2003). *Avaliação do custo-benefício de medidas de controle de cheias e despoluição urbana: estudo de caso da bacia do Rio Barigüi*. Relatório 1 – parcial. UFPR-DHS, Curitiba, 2003, 154 p.

RAPER, J. (2000). *Multidimensional Geographic Information Science*. Taylor & Francis, London.

SOUZA, J. D. (2004). *Modelo Espaço-Temporal em SIG para Análise de Qualidade da Água em uma Bacia Hidrográfica*. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Geociências, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SUDERHSA (1997). *Qualidade da Água dos Rios Paranaenses*. Curitiba.

SUDERHSA (1999). *Cadastro de Usos e Usuários de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu*. CD - Relatório final, Curitiba.

SUREHMA (1992). *Portaria de Enquadramento dos rios*. Curitiba.

WORBOYS, M. F. (1995). *GIS: A Computing Perspective*. Taylor & Francis, . London.