

# ESTRATÉGIA PARA CONSOLIDAÇÃO DE METAS PROGRESSIVAS DE QUALIDADE DE ÁGUA: Estudo de caso do Enquadramento do Rio Iguaçu

*Heloise G. Knapik<sup>1</sup>; Cristovão V. S. Fernandes<sup>2</sup>; Júlio César R. de Azevedo<sup>3</sup>; Marianne S. França<sup>4</sup>  
& Mônica Ferreira do Amaral Porto<sup>5</sup>*

**RESUMO** --- O objetivo deste estudo foi o de integrar o monitoramento de parâmetros de qualidade de água com a implementação e calibração de um modelo matemático, para definição e simulação de metas progressivas de remoção de carga, tendo em vista o enquadramento de corpos hídricos. O estudo de caso foi a Bacia do Alto Iguaçu, Região Metropolitana de Curitiba, numa área aproximada de 3.000 km<sup>2</sup>. A caracterização ambiental foi realizada a partir de matrizes de fontes de poluição, com dados de ocupação do solo, populacionais e industriais para as 26 principais sub-bacias. A estratégia utilizada para consolidar o diagnóstico da qualidade da água foi através da calibração e simulação das variáveis OD, DBO, nitrogênio e fósforo utilizando o modelo QUAL2E. Durante o processo de calibração, 14 coeficientes foram analisados e ajustados por tentativa e erro de acordo com o intervalo de 25 a 75% de permanência dos dados de campo (*Box plots*). A implementação e simulação de medidas de despoluição hídrica, com remoção de carga orgânica e de nutrientes dos afluentes, avaliada para um horizonte de 20 anos, indicou uma significativa melhora do cenário atual de qualidade da água, mesmo com um risco de não enquadramento na Classe 2 da Resolução CONAMA 357/05 no trecho mais crítico de aporte de matéria orgânica.

**ABSTRACT** --- The main goal of this study is to understand the dynamic of the organic content in a river based upon a water quality model, QUAL2E, using field measurement to achieve strategies for water quality standards through progressive goals. The case study was the Iguaçu River at the Metropolitan Area of Curitiba, covering an area of 3.000 km<sup>2</sup>. The methodology used relies on a consolidation of hydrological and water quality data base, organized in pollution sources matrix for 26 main sub-basins. This analysis is based upon BOD, DO, nitrogen and phosphorous modeling and calibration using the QUAL2E model. In the calibration procedure, 14 water quality parameters were tested and the results were compared with the field data. The main results of the implementation and simulation of the removal of organic and nutrients load indicates that, for the next projection horizon of 20 years, the probability of achieving water quality standards demanded by Brazilian regulation CONAMA 357/05 will not be achieved.

**Palavras – chave:** Bacia do Alto Iguaçu, metas progressivas, modelagem matemática.

---

<sup>1</sup> Aluna de Mestrado pela UFPR, Centro Politécnico s/n, Bloco 5, Cx. Postal 19011, 81531, Curitiba – PR. E-mail: heloise.dhs@ufpr.br

<sup>2</sup> Professor Adjunto III da UFPR, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Curitiba – PR. E-mail: cris.dhs@ufpr.br

<sup>3</sup> Professor da UTFPR, Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Curitiba, PR. E-mail: jcravevedo@utfpr.edu.br

<sup>4</sup> Aluna de Mestrado pela UFPR, Centro Politécnico s/n, Bloco 5, Cx. Postal 19011, 81531, Curitiba – PR. E-mail: marianne.dhs@ufpr.br

<sup>5</sup> Professor Titular da USP, Av. Prof. Almeida Prado, 271, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo, SP. E-mail: mporto@usp.br

## 1. INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas tem sido cada vez mais abordada pelas políticas nacionais e internacionais. Desde o início da década de 80, muito avanço houve em relação às discussões sobre temas referentes à sustentabilidade e à preservação econômica e ambiental. Neste contexto, surge a necessidade de fundamentos legais e institucionais que garantam a efetiva aplicação de conceitos ligados à gestão dos recursos hídricos. Na legislação brasileira, a Lei nº 9.433/97 consolida estes princípios e tem como objetivo assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, tendo em vista o desenvolvimento sustentável, a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, bem como a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrente do uso inadequado dos recursos.

Para garantir que tais objetivos sejam cumpridos, a lei avança ao estabelecer instrumentos de gestão, dentre os quais estão os Planos de Recursos Hídricos, que visam, através de diagnóstico da situação atual e criação de cenários futuros, fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos. A outorga, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos e enquadramento dos corpos d'água, que visam assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que foram destinadas, com diminuição de custos mediante ações preventivas permanentes, e o sistema nacional de informações sobre recursos hídricos também são instrumentos da Lei nº 9.433/97.

Para uma adequada aplicação de programas de recuperação da qualidade de corpos hídricos, o instrumento relacionado à aplicação do enquadramento dos corpos d'água poder ser um conceito muito eficaz. Uma das estratégias é a de se estabelecer metas progressivas de implementação de medidas de despoluição hídrica, que levem em consideração tanto as restrições físicas e orçamentárias para o custeio das intervenções em recursos hídricos, como a disposição da sociedade a pagar por estas intervenções.

Em bacias cujo grau de comprometimento da qualidade dos recursos hídricos é elevado, a estratégia de implementação de medidas de despoluição deve ser analisada criteriosamente. Um exemplo é a bacia do Alto Iguaçu, na Região Metropolitana de Curitiba, uma região altamente urbanizada, com recentes processos de ocupação irregular de várzeas e áreas de mananciais. Como consequência, problemas de abastecimento público têm sido observados, além de problemas com o tratamento de esgotos sanitários e sistemas de drenagem urbana, os quais não acompanham o crescimento das cidades, o que afeta negativamente o meio ambiente e a qualidade de vida das pessoas.

Para a realização desta pesquisa esforço foi dispendido para não só entender os diferentes aspectos de gestão territorial de uma bacia crítica como a do Alto Iguaçu, mas também a de

consolidar um banco de dados consistente e que permita a utilização de modelos matemáticos de qualidade da água com o firme propósito de investigar a viabilidade da implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos para a bacia em questão, com ênfase especial para a implementação e calibração do modelo QUAL2E. Parte significativa e substancial deste esforço de consolidar este banco de dados está compilada em Porto *et al.* (2007), projeto desenvolvido em parceria entre USP e UFPR nos anos de 2005 a 2007, cuja presente pesquisa está vinculada. A abordagem aqui apresentada compila os principais resultados relativos à metodologia utilizada.

## **2. ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA A IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO DE MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA**

Para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, estão previstas pela Lei nº 9.433/97 diretrizes como a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade, bem como a adequação da gestão de recursos hídricos com a significativa diversidade sócio-econômica-ambiental dominante no território brasileiro, promovendo a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental e a articulação entre os planejamentos de recursos hídricos, com a do uso do solo, setores usuários e os planejamentos regional, estadual e nacional. Tais diretrizes se fundamentam em cinco instrumentos: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos d'água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; e o Sistema de Informações sobre recursos hídricos.

Entende-se que para a efetiva consolidação desses instrumentos de gestão de recursos hídricos, previstos na Lei nº 9.433/97, são necessários investimentos para treinar e capacitar os agentes, e tentar consolidar um banco de dados de fácil entendimento, didático e de domínio público. Cabe destacar que para cumprir ao que se estabelece em lei, é necessária muita pesquisa na área de recursos hídricos e estratégias de gestão, além da integração entre a pesquisa realizada pelas universidades e os órgãos competentes, integração esta absolutamente vital para a estruturação dos Planos de Bacia. Embora conceitualmente o instrumento do Enquadramento esteja associado ao planejamento a ser consolidado pelo Comitê de Bacias Hidrográficas, a necessidade de base técnica que subsidie este processo de construção de consenso visando uma estratégia sensata para a sua efetivação faz-se necessária. A fundação para o planejamento pressupõe um conjunto de ferramentas técnicas necessárias para um melhor entendimento de como se estabelecer uma proposta de enquadramento que seja exequível e viável, e acima de tudo, se adeque à realidade legal estabelecida pelas ferramentas vigentes. A Figura 1 relaciona as principais etapas ou estudos que deverão compor o processo de enquadramento de corpos de água, qualquer que seja a estratégia a ser adotada. Estas ferramentas estão inseridas dentro de um contexto construtivo que culmina com o

plano de bacias hidrográficas, com o claro objetivo de se constituir metas para a garantia da melhoria da qualidade da água e sua importância no processo de escalonamento de investimentos (Porto *et al.*, 2007).

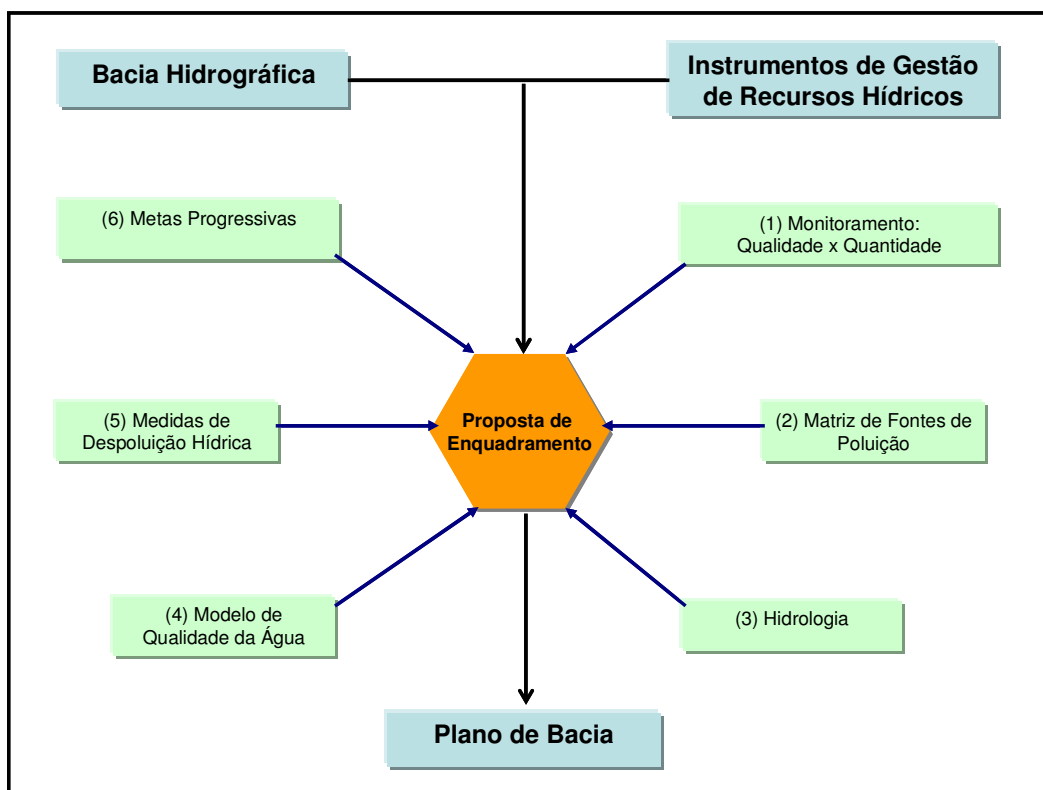


Figura 1. Etapas essenciais para a efetivação do Enquadramento

A atividade de monitoramento (1) deve sempre relacionar os dados de qualidade e quantidade, ou seja, deve permitir análise conjunta de remoção de carga e vazão de referência. A Matriz de Fontes de Poluição (2) demonstra os usos e usuários presentes na bacia, apontando o diagnóstico da situação atual e permitindo a organização de dados nas simulações da qualidade da água. Os estudos hidrológicos (3) são fundamentais para uma boa gestão de recursos hídricos e na avaliação dos riscos de não atendimento às metas estabelecidas para a qualidade da água. A modelagem da qualidade da água (4) permite uma avaliação mais significativa dos processos de transporte e sua efetiva resposta no sistema do corpo receptor. Complementarmente, o conceito de metas progressivas pressupõe a determinação de metas intermediárias de forma a escalonar a diminuição da concentração de poluentes no rio ao longo do tempo para que se atinja a meta final de qualidade da água. Para cada meta progressiva é necessário um conjunto de medidas de despoluição (5) e, conseqüentemente, a necessidade de investimentos para a implementação de tais medidas.

A base conceitual para o enquadramento de corpos d'água é fundamentada nos princípios estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05. No seu arcabouço é proposta, sem uma definição

clara, a possibilidade de se efetivar o enquadramento de bacias utilizando-se de metas progressivas. No que concerne à realidade de bacias críticas, como a bacia do Atlo Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba, a efetivação do enquadramento de corpos d'água utilizando este novo conceito passa obrigatoriamente por uma avaliação de quanto e onde se implementar as medidas de despoluição hídrica, considerando o contexto de restrições orçamentárias e físicas da região (Porto *et al.*, 2007).

## **2.1 Consolidando o diagnóstico: monitoramento de campo**

A avaliação da qualidade da água apresentada na seguinte pesquisa está vinculada ao Projeto “Bacias Críticas: Bases Técnicas para a definição de Metas Progressivas para seu Enquadramento e a Integração com os demais Instrumentos de Gestão”, desenvolvido em parceria entre a UFPR e a USP, durante o período de 2005 a 2007. Este projeto avaliou o desenvolvimento de metodologias que permitam às bacias o estabelecimento de metas progressivas para despoluição e efetivação do plano de enquadramento, trabalhando seus aspectos conceituais, institucionais e técnicos, aplicados na Bacia do Alto Iguaçu.

Com relação aos parâmetros de qualidade de água, foram analisadas as concentrações de oxigênio dissolvido, DBO, DQO, fósforo total, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato, carbono orgânico total e as frações de sólidos, através do monitoramento de campo realizado no período de junho de 2005 a julho de 2006. Os procedimentos metodológicos basearam-se em rotinas estabelecidas em APHA (1998). Complementarmente, foram analisados outros parâmetros, como condutividade, turbidez, pH, temperatura e profundidade Secchi. A vazão para cada dia de coleta foi estimada com base em leitura de nível, quando disponível, e por telemetria.

Para o monitoramento de campo realizado no desenvolvimento do Projeto Bacias Críticas foram selecionados 7 estações ao longo dos rios Iraí e Iguaçu, cobrindo uma extensão de aproximadamente 107 km, em uma área aproximada de 3.000 km<sup>2</sup>. Foram realizadas 20 campanhas no período de junho de 2005 a julho de 2006. Para a complementação dos dados de monitoramento, a presente pesquisa monitorou as mesmas estações, em 5 campanhas realizadas no período de março a agosto de 2008.

## **2.2 Implementação do modelo QUAL2E**

Para a implementação do modelo QUALE, foi necessário compilar um banco de dados para a Bacia do Alto Iguaçu, com detalhamento de 26 sub-bacias, englobando 14 municípios (Curitiba e

Região Metropolitana). Área de cada bacia, extensão dos tributários, características hidráulicas, uso e taxa de ocupação do solo, atividade industrial, dados demográficos e sistema de coleta e tratamento de esgoto formam a malha principal do banco de dados, organizados na forma de matrizes de fontes de poluição. Dos estudos utilizados como fonte desses dados, fazem parte, principalmente, o Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu (SUDERHSA, 2000), o Projeto Alto Iguaçu (Fernandes *et al.*, 2005), e o Projeto Bacias Críticas (Porto *et al.*, 2007).

Diferentemente da metodologia utilizada por Knapik (2006) e Porto *et al.* (2007), no presente estudo, os afluentes, relativos às 26 sub-bacias, não foram simulados. As considerações a respeito do balanço hídrico e da contribuição de cargas orgânicas e de nutrientes foram estimadas a partir das matrizes de fontes de poluição de cada afluente. O enfoque principal deste estudo é o trecho dos rios Iraí e Iguaçu, numa extensão de 107 quilômetros, em cujo monitoramento de campo para 7 pontos de coleta foi realizado nos anos de 2005 a 2008.

O modelo QUAL2E pode integrar a simulação de vários constituintes, com possibilidade de entrada de fontes difusas e pontuais. Assim, os dados foram organizados de maneira a atender as especificações de modelo, bem como as limitações estruturais existentes. A organização dos dados foi feita através de matrizes de fontes de poluição, desenvolvidas no programa Excel, e adequadas ao formato de entrada de dados do modelo QUAL2E.

A discretização espacial de cada bacia tem como unidade básica a divisão do trecho do rio simulado em elementos de 1 km cada. No modelo QUAL2E, são nesses elementos computacionais que o balanço de cada variável é simulado. Cada conjunto de quilômetro engloba uma área de drenagem específica, ou área incremental. Os dados hidráulicos (largura de base, declividade dos taludes e longitudinal), taxa de uso e ocupação do solo e dados demográficos e sistema de esgotamento sanitário foram discretizadas para cada área incremental, denominadas de tramos quando da implementação do modelo. Nos elementos computacionais foram discretizados a localização de grandes usuários, como indústrias (captação e lançamento), ETEs e ETAs, além do remanescente de efluente doméstico (esgoto sem tratamento) e de tributários. O diagrama topológico para o trecho em estudo dos rios Iraí e Iguaçu é apresentado na Figura 2.

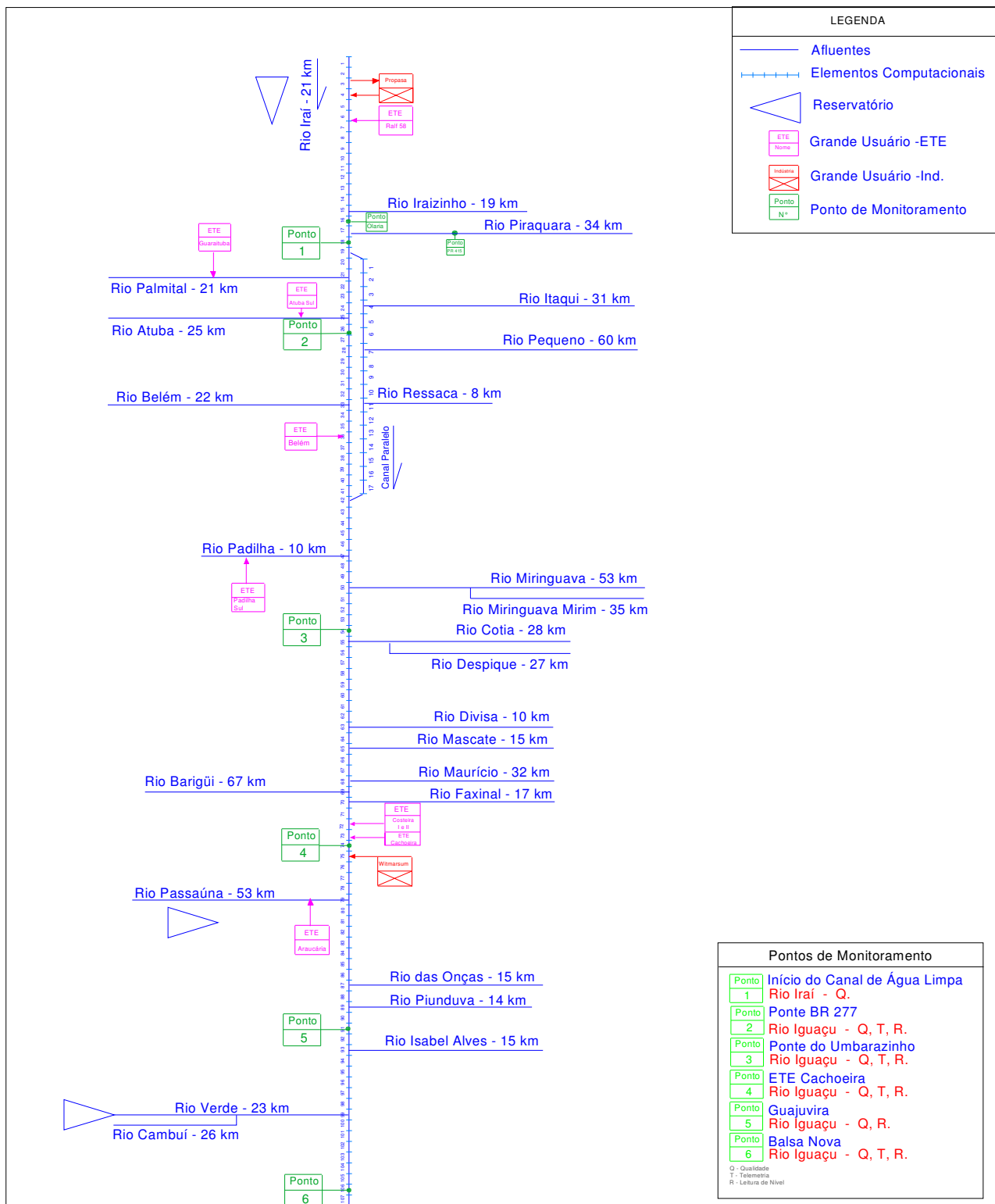


Figura 2. Diagrama topológico da Bacia do Alto Iguaçu, com localização dos principais afluentes e pontos de monitoramento.

No modelo QUAL2E, duas formas são possíveis para a simulação da condição hidráulica: através de coeficientes de descarga; ou através da equação de Manning. No presente estudo, a segunda forma foi adotada, com área de seção trapezoidal, e utilização dos seguintes dados: largura da base, declividade dos taludes e declividade longitudinal, e coeficiente de rugosidade de Manning,

discretizados para cada tramo. Neste estudo, foi utilizado um valor de 0,033 para este coeficiente (Porto *et al.*, 2007)

As vazões incrementais de cada tramo foram calculadas de acordo com as respectivas áreas de drenagem, com rotina de cálculo implementada nas matrizes de fontes de poluição, e utilização de um coeficiente único de vazão específica, calculado para diferentes perfis de permanência, determinado no Projeto Bacias Críticas (Porto *et al.*, 2007). A vazão para 95% de permanência,  $Q_{95\%}$ , foi utilizada como base das simulações. A vazão observada em campo, ou seja, perfil mediano das coletas realizadas entre 2005 e 2008,  $Q_{campo}$ , bem como os demais cenários de permanência de vazão, foram calculados a partir da vazão  $Q_{95\%}$ . As vazões específicas e os cenários de permanência utilizados foram:  $Q_{95\%} = 2,94$  l/s.km<sup>2</sup>,  $Q_{80\%} = 6,00$  l/s.km<sup>2</sup> e  $Q_{MLP} = 13,93$  l/s.km<sup>2</sup>.

Para a entrada de dados de qualidade no modelo, foram utilizadas matrizes de fontes de poluição (Cavichiolo *et al.*, 2005), baseadas no Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu (SUDERHSA, 2000), atualizadas e adequadas às simplificações estruturais existentes do modelo QUAL2E pelo Projeto Bacias Críticas (Porto *et al.*, 2007). As matrizes de fontes de poluição caracterizam-se por estarem divididas em quatro grandes grupos de dados. O primeiro corresponde aos dados característicos da bacia em análise (código da bacia, extensão do rio, áreas incrementais), o segundo corresponde às vazões (dados hidráulicos), o terceiro às cargas (difusas e pontuais) e o quarto aos dados de entrada no modelo de qualidade de água (concentração de DBO, nitrogênio, fósforo e OD).

A matriz foi construída dividindo-se cada bacia analisada em tramos, correspondentes às áreas de contribuição existentes em cada uma das 26 sub-bacias consideradas, inclusive para as áreas de drenagem relativas à bacia dos rios Iraí e Iguaçu, trecho este simulado no presente estudo. Nas matrizes dos afluentes, também foi estimado o balanço hídrico e a contribuição de cargas orgânicas e de nutrientes. Na simulação do trecho de 107 km dos rios Iraí e Iguaçu a entrada dos dados dos afluentes foram considerados como fontes pontuais.

As considerações com relação às cargas foram feitas através da divisão destas em domésticas, industriais e difusas, cada qual identificando sua origem, vazão do efluente, carga de DBO, nitrogênio e fósforo, e eficiência de remoção (quando existente). Em relação à carga difusa, três categorias de uso de solo foram consideradas: urbano, agrícola e floresta. Para cada sub-bacia, as matrizes foram adequadas quanto aos aportes de matéria orgânica, em termos de DBO, e de nutrientes, como nitrogênio (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato) e fósforo (orgânico e dissolvido), de acordo com o tipo de uso e taxa de ocupação do solo. A contribuição da matéria orgânica, em termos de concentração de DBO, foi estimada segundo Porto *et al.* (2007). Para as contribuições de nitrogênio e de fósforo, foram utilizados valores médios, indicados por Chapra (1997) e Von Sperling (2007).



A carga pontual foi estimada tanto para captações e efluentes industriais, como para efluentes provenientes de esgoto doméstico. No caso do esgoto doméstico, foi utilizada a metodologia apresentada por Von Sperling (2006), com cálculo da vazão do efluente gerada pela população de cada área incremental das bacias em estudo, e das cargas orgânicas e de nutrientes. Foram consideradas o montante de população com efluente coletado e tratado, e também no caso de coleta sem tratamento. A parcela referente ao efluente tratado corresponde às estações de tratamento de esgoto localizadas nas bacias em estudo. Em relação à parcela sem tratamento, a vazão efluente e a carga de poluente foi linearmente distribuída ao longo dos respectivos tramos (áreas).

A contribuição de esgoto doméstico com coleta e tratamento foi estimada a partir do cadastro de grandes usuários do Plano de Despoluição Hídrica (SUDERHSA, 2000), e atualizadas pelo Projeto Bacias Críticas (Porto *et al.*, 2007). As estações de tratamento de esgoto foram consideradas como fontes pontuais no modelo QUAL2E, com entrada de dados de vazão de efluente, concentração de DBO e respectiva eficiência de remoção, e concentração das frações remanescentes de nitrogênio e de fósforo. A eficiência do tratamento de remoção de matéria orgânica foi estimada de acordo com o cadastro de usuários; já para as frações de fósforo foi considerada uma remoção de 50%, e de 20% para nitrogênio amoniacal e orgânico (Von Sperling, 2007). A concentração de oxigênio dissolvido foi considerada nula para esses lançamentos.

A carga de origem industrial também foi estimada a partir do cadastro de grandes usuários do Plano de Despoluição Hídrica (SUDERHSA, 2000), com relação à contribuição de matéria orgânica. A localização das indústrias foi realizada para cada trecho simulado, tanto para captação, como para o lançamento do efluente. No caso de lançamento, são implementados os valores de vazão, concentração de DBO e eficiência de remoção de matéria orgânica, quando existente. A concentração de oxigênio dissolvido foi considerada nula para esses lançamentos.

### 2.3 Calibração do modelo QUAL2E

O desafio de calibração do modelo QUAL2E (Brown e Barnwell, 1987), apresentada no presente artigo para OD, DBO, nitrogênio e fósforo baseou-se na solução das equações de quantidade de movimento e conservação de energia integradas com as equações de transporte de poluentes, assumindo como representação simplificada o balanço da matéria orgânica pelos coeficientes de desoxigenação ( $K_1$ ), reaeração ( $K_2$ ), sedimentação ( $K_3$ ) e demanda de oxigênio do sedimento ( $K_4$ ); o balanço de nitrogênio pelos coeficientes de oxidação da amônia e nitrito ( $\beta_1$  e  $\beta_2$ ), decaimento de nitrogênio orgânico ( $\beta_3$ ), liberação de nitrogênio amoniacal pela fauna bentônica ( $\sigma_3$ ), sedimentação de nitrogênio orgânico ( $\sigma_4$ ) e taxa de consumo de oxigênio pela oxidação da amônia e de nitrito ( $\alpha_5$  e  $\alpha_6$ ); e o balanço de fósforo pelos coeficientes de decaimento e

sedimentação de fósforo orgânico ( $\beta_4$  e  $\sigma_5$ ) e liberação de fósforo inorgânico pela fauna bentônica ( $\sigma_2$ ).

Para a calibração do modelo, a exemplo do que foi realizado por Knapik (2006), Porto *et al.* (2007), e Kondageski (2008), foram realizadas tentativas de ajuste das curvas simuladas de vazão, concentração de OD, DBO, nitrogênio (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato) e fósforo (orgânico e dissolvido) num intervalo de 25 a 75 % de permanência dos respectivos dados coletados em campo, com valor ótimo próximo à mediana.

## 2.4 Implementação dos cenários de despoluição hídrica

A simulação de cenários de despoluição hídrica tem como objetivo avaliar o impacto em termos de melhoria da qualidade de água quando da implementação de medidas de despoluição hídrica. As medidas levaram em consideração ações de aumento do número de população com coleta e tratamento de esgoto, bem como a eficiência do tratamento, através da remoção de carga orgânica e de nutrientes dos afluentes, a fim de analisar o reflexo em termos de melhoria da concentração de DBO, nitrogênio amoniacal, fósforo total e oxigênio dissolvido, de acordo com os padrões estabelecidos na Resolução CONAMA 357/05.

A hipótese adotada considerou a criação de estações de tratamento de esgoto na foz de cada afluente, para um percentual de remoção de carga no ano de 2025. Dois cenários foram analisados:

- **Cenário A:** remoção de 70% de carga orgânica (DBO), 70% de nitrogênio amoniacal e 85% de fósforo inorgânico;
- **Cenário B:** remoção de 95% de carga orgânica (DBO) e de nutrientes (nitrogênio amoniacal e orgânico; fósforo total).

Para o **cenário A**, as taxas de remoção foram estimadas a partir da redução teórica necessária para reduzir a concentração para Classe 2 (Resolução CONAMA 357/05), na permanência da vazão média de longo período. Em relação aos nutrientes, a remoção foi analisada apenas para nitrogênio amoniacal e fósforo inorgânico, conforme Von Sperling, 2007.

No **cenário B**, foi considerado a taxa de remoção definida como ideal pelo Projeto Bacias Críticas (Porto *et al.*, 2007). Essa taxa de remoção implica em 100% de coleta e tratamento de esgoto, com uma eficiência de tratamento de 95%.

A avaliação dos resultados da implementação das medidas de despoluição foram avaliadas em função das curvas de permanência de concentração das variáveis em estudo. Essas curvas permitem identificar a permanência ou não de determinada variável dentro das classes de enquadramento, para diferentes cenários de vazão, e o risco de não enquadramento associado a cada permanência.

### 3. ESTUDO DE CASO DA BACIA DO ALTO IGUAÇU

O estudo de caso desenvolveu-se a partir da dinâmica da realidade de uso e ocupação do solo na bacia do Alto Iguaçu, na Região Metropolitana de Curitiba. A bacia do Alto Iguaçu tem suas nascentes junto a Serra do Mar, cujo rio principal estende-se por aproximadamente 90 km até o limite da Região Metropolitana de Curitiba, com uma área de drenagem de cerca de 3.000 km<sup>2</sup>. Na presente pesquisa, 26 sub-bacias foram utilizadas para a caracterização da Bacia do Alto Iguaçu. Os tributários principais das respectivas bacias são: Atuba, Belém, Cambuí, Cotia, Despique, Divisa, Faxinal, Iraí, Iraizinho, Isabel Alves, Itaquí, Mascate, Maurício, Miringuava, Miringuava Mirim, Padilha, Palmital, Passaúna, Pequeno, Pianduva, Piraquara, Ressaca, Rio das Onças e Verde.

A população pertencente à bacia é de aproximadamente 3 milhões de habitantes distribuídos em 14 municípios. A bacia em estudo concentra cerca de 25% da população total e 30% da população urbana do estado, com baixos índices de atendimento e tratamento de esgoto. Por ser uma região altamente urbanizada, vem passando por um processo de ocupação irregular de várzeas e áreas de mananciais, em especial na margem direita do Rio Iguaçu. Como consequência deste processo, têm sido constatados problemas acerca dos sistemas de abastecimento de água, do tratamento de esgotos sanitários e dos sistemas de drenagem urbana, os quais não acompanham o crescimento das cidades, afetando negativamente o meio ambiente e a qualidade de vida das pessoas.

O plano de simulação adotado no presente estudo foi dividido em duas etapas: simulação para a calibração do modelo QUAL2E e simulação de cenários de despoluição hídrica. Na primeira etapa, a aplicação da modelagem da qualidade da água foi realizada para o rio Iguaçu, considerando os afluentes como fontes pontuais, cujas contribuições foram estimadas nas simulações realizadas por Knapik (2006) e Porto *et al.* (2007). A etapa seguinte envolveu um estudo sobre os afluentes, quando da configuração dos cenários de despoluição hídrica.

As simulações para a calibração do modelo envolveram a análise de sensibilidade, a simulação e calibração do modelo. Na análise de sensibilidade, as simulações são realizadas com caráter investigativo sobre os coeficientes que regem o comportamento das variáveis. Nesta etapa, 14 coeficientes do modelo foram analisados, conforme apresentado em Knapik (2009).

Após a identificação da sensibilidade dos coeficientes, foi realizada a simulação das variáveis oxigênio dissolvido, DBO, nitrogênio e fósforo. Inicialmente, para se analisar a metodologia de estimativa de cargas, as concentrações de nitrogênio e fósforo foram simuladas separadamente. Para essas simulações, as matrizes de fontes de poluição, originalmente elaboradas apenas para matéria orgânica, foram adequadas com aportes de nitrogênio e fósforo, tanto por fontes pontuais, como

difusas. A calibração do modelo foi realizada a partir de informações de literatura, com ajuste dos coeficientes por tentativa e erro.

A modelagem da DBO envolve processos biológicos e físicos de remoção da matéria orgânica da coluna d'água. A desoxigenação carbonácea, representada no modelo QUAL2E pelo coeficiente  $K_1$ , é um processo de degradação biológica, e que envolve o consumo de oxigênio presente no ambiente aquático. Já a remoção física da matéria orgânica se dá através do processo de sedimentação, representado no modelo QUAL2E pelo coeficiente  $K_3$ . Para ambos os coeficientes foram avaliadas faixas de valores indicados em literatura (Bowie *et al.*, 1985; Chapra, 1997; Von Sperling, 2007).

A modelagem no nitrogênio, para as frações orgânica, amoniacal, nitrito e nitrato, baseou-se em dois processos: conversão e remoção. Na conversão, foram simulados o decaimento de nitrogênio orgânico à amoniacal ( $\beta_3$ ) e a nitrificação ( $\beta_1$  e  $\beta_2$ ). Uma das formas de remoção desse nutriente simuladas no modelo QUAL2E é através da sedimentação do nitrogênio orgânico, representado pelo coeficiente  $\sigma_4$ . O aporte de nitrogênio foi simulado através de fontes difusas, pontuais, e pela liberação de amônia pela fauna bentônica ( $\sigma_3$ ).

A simulação da concentração de fósforo total, assim como a de nitrogênio, foi realizada de maneira simplificada, visto a não inclusão da interação com algas, uma vez que a concentração de clorofila-a no ambiente estudado mostrou-se pouco significativa, conforme apresentado nos resultados do monitoramento de campo. No balanço da concentração de fósforo, apenas foi considerado o decaimento de fósforo orgânico para inorgânico,  $\beta_4$ , a liberação de fósforo dissolvido pela fauna bentônica,  $\sigma_2$ , e a perda de fósforo particulado da coluna d'água através da sedimentação,  $\sigma_5$ .

A modelagem do oxigênio dissolvido realizada pelo modelo QUAL2E (Brown e Barnwell, 1987), permite a análise das interações da presença de matéria orgânica, de nitrogênio, fósforo e algas no corpo hídrico. No presente estudo, conforme apresentado nos itens anteriores, não foi simulada a interação entre algas e os ciclos do nitrogênio e fósforo, e, conseqüentemente, a relação entre clorofila-a e a concentração de oxigênio dissolvido. Dessa maneira, os fatores que influenciam, neste caso, diretamente no consumo/ liberação de OD no corpo hídrico são: desoxigenação carbonácea ( $K_1$ ), reaeração atmosférica ( $K_2$ ), demanda de oxigênio pelo sedimento ( $K_4$ ), oxidação da amônia e do nitrito ( $\beta_1$  e  $\beta_2$ ), e as taxas de consumo de oxigênio no processo de nitrificação ( $\alpha_4$  e  $\alpha_5$ ), referentes ao balanço de massa da matéria orgânica e de nitrogênio. Na calibração da concentração de oxigênio dissolvido, 3 coeficientes diretamente envolvidos não foram alterados, visto que os valores utilizados estão sujeitos à calibração da concentração de DBO e de nitrogênio ( $K_1$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$ ). Em relação aos demais coeficientes, dois apresentaram maior sensibilidade,  $K_2$  e  $K_4$ , sendo o coeficiente de reaeração mais sensível que a demanda de oxigênio pelo sedimento.

Desta maneira, foi utilizado um valor constante para  $K_4$ ,  $\alpha_4$  e  $\alpha_5$ , de acordo com indicações de literatura, e avaliadas diferentes combinações para as equações de reaeração disponíveis no modelo QUAL2E. Os resultados da calibração para DBO, nitrogênio amoniacal, fósforo total e oxigênio dissolvido são apresentados na Figura 3. Os coeficientes utilizados na calibração do modelo são apresentados na Tabela 1.

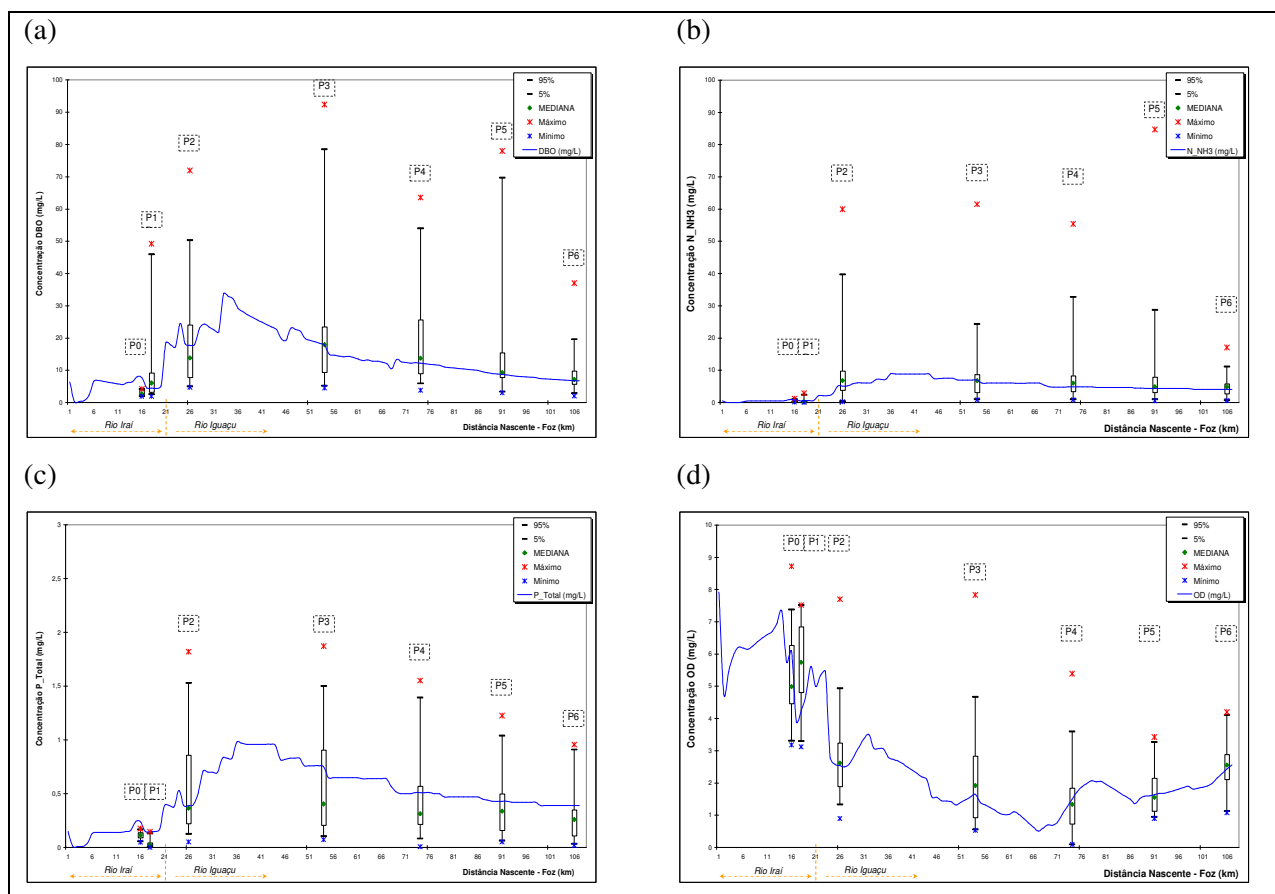


Figura 3. Curvas de calibração para concentração de DBO (a), nitrogênio amoniacal (b), fósforo total (c) e OD (d), com os *Box plots* dos dados de monitoramento de 2005 a 2008 nos pontos P0 a P6

Com o modelo calibrado, foram realizadas simulações da qualidade da água nos rios Iraí e Iguaçu para três perfis de vazões ( $Q_{95\%}$ ,  $Q_{80\%}$  e  $Q_{MLP}$ ), para os anos de 2005 (diagnóstico) e 2025 (prognóstico), período este considerado na abordagem de definição e aplicação de metas progressivas pelo Projeto Bacias Críticas (Porto *et al.*, 2007). O diagnóstico da qualidade da água foi realizado a partir do banco de dados do Projeto Bacias Críticas (Porto *et al.*, 2007), que analisou aspectos demográficos, atendimento e tratamento de esgoto, atividade industrial e ocupação urbana para o período de 2005 a 2025. No presente estudo, as análises foram realizadas a partir da estimativa de cargas orgânicas e de nutrientes em função do crescimento populacional para o mesmo período de análise. Para o prognóstico do ano de 2025, não foi considerado um aumento de coleta e tratamento de esgoto nas estações de tratamento de esgoto em atividade no ano de 2005.

Para consolidar o estudo de caso, foi realizado um exemplo de aplicação da modelagem matemática integrada ao conceito de metas progressivas.

Tabela 1 Coeficientes utilizados na calibração do modelo QUAL2E, para simulação de DBO, OD, nitrogênio e fósforo

<i>Coeficiente</i>	<i>Unidade</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valor utilizado</i>	<i>Faixa de variação</i> <sup>(1)</sup>
K <sub>1</sub>	1/d	Desoxigenação carbonácea	0,1	0,02 – 3,4
K <sub>2</sub>	1/d	Raeração atmosférica	<sup>(2)</sup>	0,0 – 100
K <sub>3</sub>	1/d	Sedimentação da matéria orgânica	1,2	variável
K <sub>4</sub>	g/m <sup>2</sup> .d	Demanda de oxigênio pelo sedimento	1,5	variável
β <sub>1</sub>	1/d	Oxidação da amônia	0,1 e 0,3	0,1 – 1,0
β <sub>2</sub>	1/d	Oxidação do nitrito	0,8	0,2 – 2,0
β <sub>3</sub>	1/d	Taxa de conversão de <i>N_Org</i> para <i>N_NH<sub>3</sub></i>	0,1 e 0,4	0,02 – 0,4
β <sub>4</sub>	1/d	Decaimento do <i>P_Org</i> para <i>P_Diss</i>	0,35	0,01 – 0,7
σ <sub>2</sub>	mg_P/m <sup>2</sup> .d	Taxa de aporte de <i>P_Diss</i> por fauna bentônica	0,1	variável
σ <sub>3</sub>	mg_N/m <sup>2</sup> .d	Taxa de aporte de <i>N_NH<sub>3</sub></i> por fauna bentônica	0,25	variável
σ <sub>4</sub>	1/d	Taxa de sedimentação de <i>N_Org</i>	0,08	0,001 – 0,1
σ <sub>5</sub>	1/d	Taxa de sedimentação de <i>P</i>	0,2	0,001 – 0,2
α <sub>5</sub>	mg_O/mg_N	Taxa de consumo de oxigênio por unidade de <i>N_NH<sub>3</sub></i> oxidado	3,5	3,0 – 4,0
α <sub>6</sub>	mg_O/mg_N	Taxa de consumo de oxigênio por unidade de nitrito oxidado	1,14	1,0 – 1,14

<sup>(1)</sup> Valores sugeridos por Bowie *et al.* (1985) Brown e Barnwell (1987), Chapra (1997), Von Sperling (2007) e/ou limites do modelo QUAL2E;

<sup>(2)</sup> Utilizada uma combinação das seguintes equações (disponíveis no modelo QUAL2E para o cálculo do coeficiente K<sub>2</sub>): O'Connor e Dobbins (1958), Owens *et al.* (1964), Thackston e Krenkel (1966), Tsvoglou e Wallace (1972), citados por Brown e Barnwell (1987).

Os resultados das simulações cenários de despoeiração hídrica (A e B) são apresentados em termos de permanência de DBO, nitrogênio amoniacal, fósforo total e oxigênio dissolvido (Figura 4), nas classes 2 e 3 da Resolução CONAMA 357/05, para o ponto de monitoramento P2, localizado no rio Iguçu, município de São José dos Pinhais, limite com Curitiba, a jusante da foz do rio Atuba. Este ponto possui uma área de drenagem de aproximadamente 625,5 km<sup>2</sup>, englobando as bacias dos rios Atuba, Iraí, Iraízinho, Palmital e a parte inicial da bacia do rio Iguçu. Em termos demográficos, esta área abriga um montante de aproximadamente 810.000 habitantes, e projeção para 1.1 milhões de habitantes em 2025, com porcentagens de coleta e tratamento de esgoto na faixa de 20 a 47% no ano de 2005 segundo levantamento realizado por Porto *et al.* (2007).

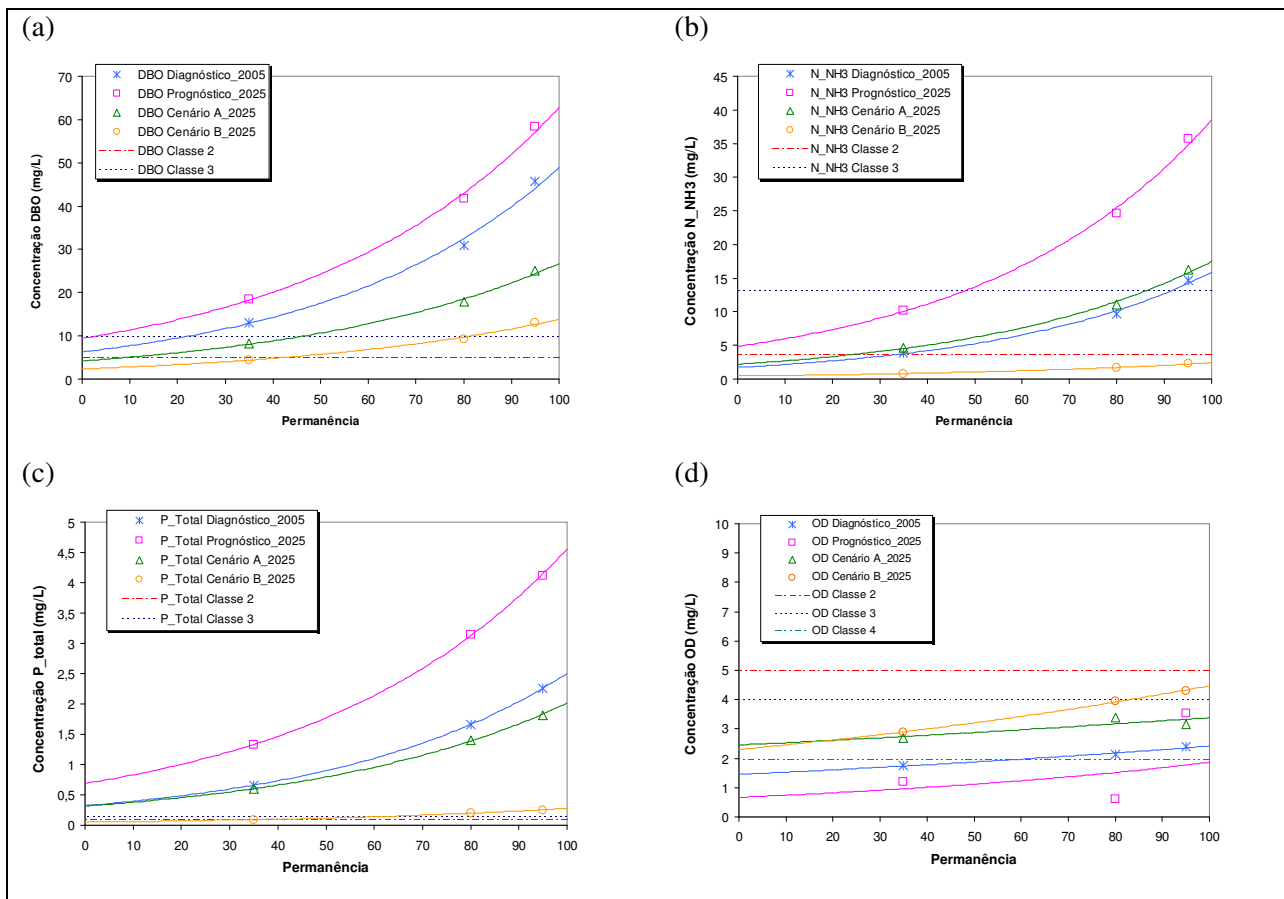


Figura 4. Ponto de monitoramento P2: permanência nas classes 2 e 3 da Resolução CONAMA 357/05, para concentração de DBO (a), nitrogênio amoniacal (b), fósforo total (c) e OD (d)

A exemplo do ponto de monitoramento P2, a condição de não se fazer ações de remoção de carga estabelecem um patamar de poluição orgânica (DBO) de 58 mg/L em 2025, para uma vazão de referência de 95% de permanência, e uma medida de 18 mg/L, menos restritiva para uma vazão de 35% de permanência (Figura 4a). O cenário A garante metas que se consolidam por redução efetiva de carga de 25 mg/L em 2025 para permanência de 95%, e, apesar da redução da concentração de DBO, a condição de enquadramento na classe 2 não é satisfeita. Nesse ponto em especial, a meta de enquadramento em classe 2 para DBO, em relação aos cenários analisados, envolve um risco de não atendimento de classe de 90% para o cenário A, e de 57% para o cenário B. Em relação a concentração de nutrientes, a redução de carga de nitrogênio adotada no cenário B possibilita o enquadramento na classe 2 para concentração de amônia (Figura 4b), com uma redução da concentração de 36 mg/L em 2025 e  $Q_{95\%}$ , para menos de 3 mg/L. No cenário A, cuja redução de carga foi simulada apenas para a fração amoniacal, a concentração em 2025 ficou superior ao diagnóstico para 2005. Neste caso, a contribuição de nitrogênio orgânico nos processos de decaimento podem ter influenciado na concentração final de nitrogênio amoniacal. Para fósforo total (Figura 4c), o risco de não atendimento da classe 2 é elevado (60%) mesmo para as medidas de redução propostas no cenário B, com eficiência de remoção de carga de 95%. Como resultado, a

concentração de oxigênio dissolvido não apresenta ganhos significativos, permanecendo principalmente em concentrações para classe 4 em ambos os cenários (Figura 4d).

De acordo com os resultados, é interessante destacar os efeitos de degradação ambiental em razão da poluição hídrica, principalmente pela característica orgânica/ doméstica da matriz de fontes de poluição da Bacia do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba. O trecho de 40 quilômetros a jusante da foz do rio Iraí reflete bem a condição das altas taxas de urbanização e ocupação das bacias dos rios Palmital, Atuba, Belém, Padilha e Barigüi. Em comum, esses rios drenam boa parte da rede urbana de Curitiba e Região Metropolitana, com uma população de aproximadamente 2 milhões de habitantes, e porcentagem de tratamento de esgoto entre 20 e 50%. Claramente, essa região carece de um plano eficaz de medidas de despoluição hídrica, principalmente com relação à diminuição do aporte de carga orgânica.

O trecho entre os pontos P0 e P1, localizados no rio Iraí, possuem uma forte vocação de abastecimento urbano, com condições de qualidade compatível com o uso do recurso hídrico e com perspectiva de um enquadramento mais rigoroso. Para os demais pontos de controle, observa-se a importância da diluição para a melhoria de qualidade da água, porém com condições de enquadramento ainda distante da condição de cenário ideal. Do ponto de vista de metas progressivas neste caso, a situação do enquadramento só é perceptível se analisado o efeito de redução de concentração para os 20 anos de estudo, mesmo que ainda sem atingir os níveis adequados para garantir uma boa qualidade do recurso hídrico.

#### **4. IMPLICAÇÕES SOB O PONTO DE VISTA DA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

Esta pesquisa destaca aspectos conceituais que são relevantes nas questões relacionadas à gestão dos recursos hídricos. A Lei 9.433/97 avança ao estabelecer fundamentos e instrumentos para sua gestão integrada, descentralizada e participativa. Neste contexto, os princípios que norteiam esta estratégia deve ser entendida com um enfoque diferente dos mecanismos de fiscalização e controle tradicionais. Impõe-se uma nova forma de abordagem técnica necessária para o atendimento das demandas impostas pelo referido instrumento legal. Por exemplo, questões que ainda precisam ser respondidas: qual parâmetro ou conjunto de parâmetros que representem a real condição de poluição, sujeitos à dinâmica da matriz de fontes de poluição, considerando que varia no tempo e no espaço; como integrar a variabilidade hidrológica com as condições de qualidade de água; como interpretar poluição pontual e difusa. No que diz respeito à matriz de fontes de poluição, a sua atualização e otimização, associada ao monitoramento de campo e à modelagem matemática da qualidade da água, são fundamentais para proporcionar ao gestor identificar as fragilidades e as potencialidades de uma bacia hidrográfica.



Adicionalmente, para cumprir o que se estabelece na legislação, a série histórica de dados de qualidade de água deve ser tão abrangente e consistente quanto às séries hidrológicas. Assim, é fundamental investir não só na formação e capacitação de técnicos, como também na implementação das estações de monitoramento. Complementarmente, é necessário o aperfeiçoamento e o controle de qualidade dos ensaios laboratoriais e dos procedimentos e técnicas, uma vez que erros ou incertezas causam impactos na análise estatística dos dados, e, por conseguinte, no diagnóstico da qualidade da água.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, o objetivo principal foi o de integrar o monitoramento de campo na implementação e calibração de um modelo de qualidade de água, QUAL2E, para definição e simulação de metas progressivas de remoção de carga, tendo em vista o enquadramento de corpos hídricos na Bacia do Alto Iguaçu.

Os efeitos da poluição para condições distintas de vazões ( $Q_{95\%}$ ,  $Q_{80\%}$  e  $Q_{MLP}$ ), e o prognóstico para 2025, confirmam o estado de degradação ambiental em que se encontram os rios Iraí e Iguaçu, simulados no presente estudo, e os afluentes que drenam a parte mais urbanizada na Bacia do Alto Iguaçu, entre eles os rios Palmital, Atuba, Belém, Padilha e Barigüi. As medidas de remoção de carga orgânica e de nutrientes analisadas nesse trecho indicam que mesmo com significativas taxas de coleta e tratamento de esgotos (95% de eficiência para 100% de coleta no cenário B), ainda há o risco de se permanecer fora de classe 2.

Esta pesquisa contribuiu na consolidação do diagnóstico da qualidade da água da Bacia do Alto Iguaçu, a partir da combinação de ferramentas de gestão de recursos hídricos como monitoramento da qualidade da água nos rios Iraí e Iguaçu, com as estimativas de cargas (matriz de fontes de poluição) e vazões (estudos hidrológicos) e da simulação e calibração do modelo QUAL2E, para as variáveis oxigênio dissolvido, DBO, nitrogênio e fósforo. Estas ferramentas são fundamentais para a definição de metas progressivas quando da elaboração do plano de bacias hidrográficas, a fim de se garantir a melhoria da qualidade da água compatível com os usos e de acordo com as possibilidades de investimento.

Finalmente, é importante destacar que a metodologia de construção de processos de enquadramento dos corpos d'água deve ser realizada segundo as reais necessidades e anseios da sociedade atual. Desta maneira, a inserção da modelagem da qualidade da água no processo de gestão dos recursos hídricos é fundamental para atingir tal objetivo.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem o apoio financeiro através do Edital MCT/CNPq/CT-Hidro nº 40/2006, pela concessão da bolsa de mestrado, e do Edital Hidro/GRH 01/2004 da FINEP/CNPq/CT-Hidro, no Projeto Bacias Críticas: Bases Técnicas para a definição de Metas Progressivas para seu Enquadramento e a Integração com os demais Instrumentos de Gestão.

## BIBLIOGRAFIA

BOWIE, G. L.; MILLS, W. B. ; PORCELLA, D. B. ; CAMPBELL, C. L. ; PAGENKOPF, J. R. ; RUPP, G. L. ; JOHNSON, K. M. ; CHAN, P. W. H. ; GHERINI, S. A. (1985). “*Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling.*” 2. ed. Athens: United States Environmental Protection Agency, 1985. 455 p.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Relator: Fernando Henrique Cardoso. Diário Oficial da União, Brasília, 8 de janeiro de 1997.

BROWN, L. C.; BARNWELL, T. O. Jr. (1987). “*The Enhanced Stream Water Quality Model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Computer Program Documentation and User Manual.*” Athens: United States Environmental Protection Agency, 1987. 189 p.

CHAPRA, S. C. (1997) “*Surface Water Quality Modeling*”. New York: McGraw-Hill, 1997. 844 p.

CONAMA. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Relator: Marina Silva. Diário Oficial da União, Brasília, 18 de março de 2005.

CAVICHIOLO, G.; FERNANDES, C. V. S.; KNAPIK, H. G.; FRANÇA, M. S.; BRAGA, M. C. B.; PORTO, M. F. A. (2005) “*A importância da matriz de fonte de poluição na implementação do enquadramento com metas progressivas*”. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16, 2005, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABRH, 2005, 20 p.

FERNANDES, C. V. V.; MARIN, M. C. F. C.; TREVISAN, E.; MACHADO, E. S.; RAMOS, F.; FEIL, A.; RAMOS, F. A.; BÄUMLE, A. M.; GOMES, K. C.; GROXKO, P. G. (2005) “*Análise de Sustentabilidade Econômica e Ambiental de Metas de Despoluição Hídrica: Estudo de Caso do Alto Iguaçu*”. Curitiba: UFPR – Departamento de Hidráulica e Saneamento, 2005. (FINEP/ CT-HIDRO). Projeto concluído.

KNAPIK, H. G. (2006) “*Modelagem da Qualidade da Água da Bacia do Alto Iguaçu: Monitoramento e Calibração*”. Curitiba, 2006. 130 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná.

KNAPIK, H. G. (2009) “*Reflexões sobre monitoramento, modelagem e calibração na gestão de recursos hídricos: estudo de caso da qualidade da água da Bacia do Alto Iguaçu*”. Curitiba, 2009. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

KONDAGESKI, J. H. (2008) “*Calibração de Modelo de Qualidade de Água para Rio utilizando Algoritmo Genético*”. Curitiba, 2008. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

PORTO, M. F. et al..(2007) “*Bacias Críticas: Bases Técnicas para a definição de Metas Progressivas para seu Enquadramento e a Integração com os demais Instrumentos de Gestão*”. Curitiba: UFPR – Departamento de Hidráulica e Saneamento, 2007. (FINEP/ CT-HIDRO). Projeto concluído.

SUDERHSA. (2000) “*Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu*”. Programa de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Curitiba – Relatórios Finais. Curitiba: SUDERHSA, 2000. Projeto concluído.

VON SPERLING, M. (2006) “*Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*”. 3. ed. Minas Gerais: DESA / UFMG, 2006. 452 p.

VON SPERLING, M. (2007) “*Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios*”. Minas Gerais: DESA / UFMG, 2007. 588 p.