

MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA EM UM TRECHO DO RIO CAPIBARIBE

Diogo Henrique Fernandes da Paz¹; Maria Mariah W.E.C. de Farias²; Ioná Maria Beltrão Rameh Barbosa³

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE. Av. Professor Luís Freire, 500, Cidade Universitária, 50740-540. Email: diogo.henriquepaz@gmail.com

² Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Centro Acadêmico do Agreste - CAA

³ IFPE - Departamento de Infraestrutura e Construção Civil

ABSTRACT

The catchment area of the Capibaribe river presents serious water quality problems. This is due the lack of sanitation infrastructure in the municipalities bordering the Capibaribe River coupled up to low flows rate. Modeling studies of the nutrients in the water issue have an important role to define strategic actions for the management of the river basins. This study presents water quality modeling results at the Capibaribe river, located between CB-60 and CB-80 monitoring stations. The QUAL-UFMG model was used to simulate the Dissolved Oxygen (DO) and Biochemical Oxygen Demand (BOD). It used the automatic calibration using Solver algorithm and manual calibration. To apply the model, the organic load from the domestic sewage of São Lourenço da Mata and Camaragibe was taken in consideration as well the slaughterer located in this area. Based on the observed data, the model showed efficient to simulate the parameters of the river in this stretch.

Palavras-chave: water quality modeling, Dissolved Oxygen (DO), Biochemical Oxygen Demand (BOD)

INTRODUÇÃO

A água é um recurso finito e, dependendo de sua localização no globo e como está sendo gerenciada, pode ser escassa ou não. Por ser dotada de grande valor econômico, segundo a Lei nº 9.433/97, que trata da Política Nacional de Recursos Hídricos, é um recurso tão importante que pode definir a capacidade de desenvolvimento a qual um país pode alcançar (POLETO *et al*, 2010).

Os recursos hídricos são caracterizados de duas formas: com relação à sua quantidade e com relação à qualidade. Essas duas formas estão intimamente relacionadas. A qualidade da água depende diretamente da quantidade de água existente para dissolver, diluir e transportar as substâncias benéficas e maléficas para os seres que compõem as cadeias alimentares.

A água é um dos recursos naturais mais utilizados pela humanidade, sendo essencial para inúmeros fins como: abastecimento doméstico, comercial e industrial; irrigação; dessedentação de animais; preservação da flora e da fauna; recreação e lazer; geração de energia elétrica, navegação e diluição de despejos. Contudo, esses múltiplos usos têm superado a capacidade dos corpos hídricos de se recompor. O aumento da industrialização e o crescimento da população têm feito com que os parâmetros físicos, químicos e biológicos da água sejam alterados, causando assim uma poluição dos recursos hídricos. As emissões de nutrientes nos corpos d'água são provenientes de fontes *pontuais*, onde as emissões se dão em locais específicos, e *difusas*, que são resultantes de ações dispersas, não havendo um ponto único de lançamento (BARROS, 2006).

As emissões de nutrientes nos corpos d'água, provenientes de fontes pontuais e difusas, são causadoras de diversos problemas nos ecossistemas aquáticos, os quais tendem a se agravar devido ao uso incorreto feito pelo homem e das atividades que este desenvolve na bacia hidrográfica. As consequências negativas da poluição da água podem ser de caráter sanitário, ecológico, social ou econômico (MOTA, 2003).

Conforme Campos e Studart (2001), os corpos d'água, principalmente os rios, apresentam a capacidade de purificar suas águas através de processos naturais. Tal fenômeno é chamado de "autodepuração". A autodepuração ocorre, mas não exclusivamente, devido ao efeito dos raios solares, da precipitação de particulados e da reaeração da água. Braga *et al* (2005) afirmam que quando a matéria

orgânica biodegradável é despejada no meio aquático, os decompositores fazem sua digestão por meio de mecanismos bioquímicos. Os seres decompositores aeróbios respiram o oxigênio dissolvido na água e passam a competir com os demais organismos. A redução dos teores de oxigênio dissolvido através do excesso de consumo pelos decompositores prejudica a sobrevivência dos demais seres consumidores. Para simular o processo de autodepuração e reaeração dos corpos hídricos, é necessária a utilização de modelos matemáticos.

Os modelos matemáticos são técnicas que permitem representar alternativas e simular condições reais que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incertezas, inerentes ao conhecimento técnico-científico (TUCCI, 2001). Conforme Sperling (2007), os modelos matemáticos são compostos por uma *estrutura teórica*, formadas pelas equações matemáticas, os *valores numéricos dos coeficientes da equação* e os dados de entrada e saída, preenchidas pelas medições de campo ou laboratório, relacionando com a resposta do sistema. Há vários modelos matemáticos que podem ser aplicados em recursos hídricos, dentre eles existem os que simulam a qualidade da água que têm por objetivo a simulação de forma simples e prática do comportamento das características hidrológicas, físicas, químicas e biológicas ao longo do rio.

O conhecimento do comportamento qualitativo do corpo d'água é essencial na gestão dos recursos hídricos, sendo uma ótima ferramenta para a tomada de decisão. Tais modelos vêm sendo utilizados desde o clássico modelo de Streeter e Phelps (1925) ao utilizar como parâmetro o Oxigênio Dissolvido (OD) e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), servindo de base aos modelos mais avançados disponíveis atualmente. Ainda hoje, muitas simulações são feitas utilizando o Streeter-Phelps (SPERLING, 2007). É possível, através da modelagem, obter e utilizar os resultados para antever as alterações na qualidade da água bem como o comportamento hídrico face ao aumento ou decréscimo da poluição existente, decorrente de fonte pontual ou difusa. Dessa forma, subsidia a tomada de decisão por parte do Poder Público, podendo minimizar os efeitos negativos sobre a qualidade da água

O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos com a calibração dos coeficientes do modelo de qualidade da água QUAL-UFMG para um trecho do Rio Capibaribe, de forma a simular o comportamento do OD e da DBO ao longo do rio.

Vale ressaltar que o QUAL-UFMG possibilita a modelagem em rios utilizando planilhas em Excel e foi estruturado baseado no modelo QUAL-2E, desenvolvido pela US *Environmental Protection Agency* (USEPA) que, por sua vez, utiliza as equações de Streeter-Phelps. O QUAL-2E é mundialmente utilizado para a simulação da qualidade da água em rios (Sperling, 2007).

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe possui uma área de drenagem de aproximadamente 7.500 km², compreendendo 42 municípios, dos quais 27 com sua sede inserida na bacia. Está localizada na porção norte-oriental do estado de Pernambuco (**Figura 1**), abrangendo áreas entre as coordenadas geográficas 7°41'20" e 8°19'30" de latitude sul, e 34°51'00" e 36°41'58" de longitude a oeste de Gr. Esta bacia está inserida nas Regiões de Desenvolvimento Metropolitana – RMR, Mata Norte, Mata Sul, Agreste Setentrional e Agreste Central. Embora contida, cerca de 2/3 da sua área na zona do agreste, a bacia do Capibaribe apresenta-se mais caracterizada pelo regime temporário na maior parte de seu curso, sendo o regime permanente encontrado, aproximadamente, a partir do município de Limoeiro (PERNAMBUCO, 2002).



Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, Pernambuco
Fonte: Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco (SRHE), 2010.

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe é uma das mais importantes do Estado de Pernambuco. Segundo a Expedição Capibaribe, que aconteceu em 2007, o rio garante água para um em cada três moradores urbanos de Pernambuco (RAMOS, 2007).

Segundo a Agência Nacional de Águas, a disponibilidade hídrica *per capita* na bacia é de 428 m³/hab.ano, bastante inferior a média no país, o que a torna uma bacia pobre em quantidade de água disponível para aproveitamento (BRASIL, 2002). Atrelado a isto, soma-se a falta de infraestrutura de saneamento básico, mais especificamente à coleta e tratamento de esgotos domésticos, fazendo com que, além das baixas vazões, a bacia também apresente problemas com a qualidade das águas. Infelizmente, hoje ela possui sérios problemas de poluição pela grande quantidade de despejo de resíduos no seu leito. Ao longo do seu percurso, o rio recebe considerável quantidade de lixo e efluente doméstico e industrial provenientes dos municípios que o margeiam.

Para a escolha do trecho a ser modelado, foi analisada toda a série de dados históricos de vazão e de qualidade (OD e DBO) dos postos de monitoramento existentes na calha do rio Capibaribe. A escolha se deu em função da disponibilidade de dados, assim como pela possibilidade de modelagem sem que houvesse a interferência de um barramento (reservatório), pois este modifica completamente a dinâmica e o curso natural do rio. Foi escolhido um trecho do rio Capibaribe que se encontra comprometido pelo grande lançamento de esgotos. Neste trecho há postos de qualidade da água que servem como base de dados observados. Estes postos de monitoramento da qualidade da água são gerenciados pela Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Pernambuco (CPRH). Foi escolhido o período de estiagem pelo fato deste ser a época mais crítica em relação à quantidade e qualidade da água. O trecho é definido entre dois postos de monitoramento da qualidade, o **CB-60** e **CB-80**, com 21,5 km de extensão, e ainda possui os postos **CB-71** e **CB-72**. A **tabela 1** traz as coordenadas e a localização exata deles.

Ao longo do percurso, o rio principal pode apresentar contribuições de tributários e de lançamentos (esgotos domésticos e efluentes industriais), os quais contribuem para aumentar a vazão, assim como captações de água no rio, o que ocasiona a diminuição da sua vazão. Para aplicação no modelo foi considerada a carga orgânica proveniente dos esgotos domésticos das cidades de Camaragibe e São Lourenço da Mata além do lançamento "in natura" de efluentes de um matadouro público localizado neste município. Também foi considerada na modelagem a captação de água da empresa Rodoviária Metropolitana para uso industrial (lavagem de veículos).

Tabela 1. Localização dos postos de monitoramento da qualidade da CPRH.
Fonte: CPRH

Posto	Coordenadas	Localização
CB-60	25M 02709042 UTM 9117156	Rio Capibaribe, Após receber seus afluentes, rios Goitá e Tapacurá, na ponte à montante da Usina Tiúma, captação da Compesa, no município de São Lourenço da Mata
CB-71	25M 0273638 UTM 9115620	Rio Capibaribe, na captação da Compesa - Castelo, no município de São Lourenço da Mata
CB-72	25M 0275870 UTM 9115220	Rio Capibaribe, a jusante da cidade de São Lourenço da Mata, no local da antiga Barragem, no município de São Lourenço da Mata
CB-80	25M 0284312 UTM 9111778	Na ponte da Av. Caxangá, na cidade do Recife.

Todos esses dados espaciais foram manipulados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas - SIG, de modo a caracterizar detalhadamente o trecho estudado, conforme mostra a **figura 2**.

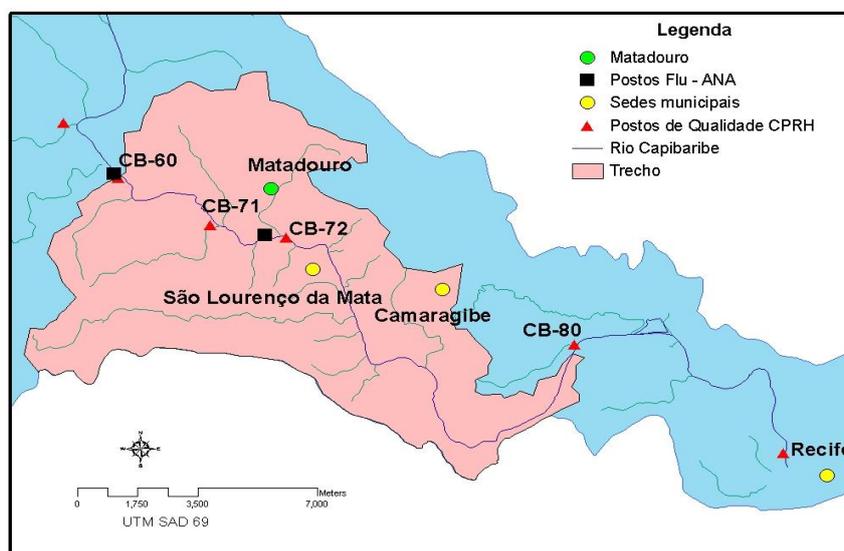


Figura 2. Localização do trecho e dos postos utilizados na modelagem.

Para manipulação de dados espaciais foi utilizado o *software* ArcGIS 9.2, produzido pela ESRI, disponibilizado pelo Grupo de Recursos Hídricos – GRH da UFPE. Com o auxílio da ferramenta *watershed*, contida no *ArcTool Box* deste programa foi possível delimitar a área de estudo e, com as coordenadas dos pontos de lançamento de esgoto, identificar o ponto de captação de água e os postos monitoramento da qualidade da água e de vazão. Com estes elementos e alguns mapas temáticos num SIG foi possível um maior detalhamento da área do trecho estudado.

A **figura 3** mostra a localização do posto CB-60, na ponte em Tiúma em São Lourenço da Mata, que determina o ponto inicial da modelagem, enquanto a **figura 4** mostra a localização do ponto final da modelagem, que é o posto CB-80, na ponte da Avenida Caxangá, no município de Recife/PE.



Figura 3. Localização do posto CB-60 (Ponte em Tiúma)



Figura 4. Localização do Posto CB-80 (Vista da ponte da Caxangá)

Os dados de entrada necessários ao modelo foram obtidos através da média aritmética do período de 2001 a 2008, para os meses de Setembro a Março, considerados de estiagem devido ao índice pluviométrico ser bastante reduzido nesta época do ano. A obtenção dos dados de entrada necessários para a modelagem são descritas a seguir.

Vazão do rio (Qr)

Os dados de vazão foram obtidos através do Plano Hidroambiental do Capibaribe (SHRE, 2010), que por sua vez utilizou-se de uma série de vazões geradas pelo programa MODHAC. Neste trabalho são utilizadas as vazões geradas para a Unidade Administrativa 4 (UA4) (**Tabela 2**).

Tabela 2: Dados de vazão para a UA4
Fonte: SHRE (2010)

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2001	0.20	0.08	0.03	0.94	0.32	50.80	37.71	27.47	13.95	1.04	0.39	0.14
2002	0.05	0.02	1.05	0.39	9.47	75.05	36.58	22.50	1.93	0.55	0.21	0.07
2003	0.03	0.01	2.11	1.20	2.15	51.56	30.21	18.47	6.25	0.52	0.20	0.07
2004	0.82	1.26	0.42	5.21	21.47	108.19	42.43	26.89	12.83	0.56	0.21	0.08
2005	0.03	0.01	0.00	0.00	25.26	221.35	33.77	37.10	14.49	1.43	0.54	0.19
2006	0.07	0.03	0.01	1.04	4.72	56.93	26.27	16.11	1.33	0.47	0.18	0.06
2007	0.02	0.01	0.00	10.15	10.54	63.73	31.42	28.44	18.29	1.27	0.48	0.17
2008	0.06	0.02	6.34	0.00	14.40	24.06	31.79	30.66	12.28	1.38	0.52	0.19
2009	0.07	1.44	0.46	11.85	21.16	30.22	40.41	39.85	18.85	1.46	0.56	0.20

A determinação da vazão média no trecho inicial da modelagem foi feito da seguinte forma:

$$Q_{\text{esp}} = \frac{Q_{\text{UA4}}}{A_{\text{UA4}}}$$

$$Q_i = Q_{\text{esp}} \times A_i$$

Onde: Q_{esp} é a vazão específica na UA4
 Q_{UA4} é a vazão média na UA4
 A_{UA4} é a área da UA4
 Q_i é a vazão média inicial do trecho modelado
 A_i é a área incremental entre a UA4 e o ponto inicial da modelagem

Vazão de esgotos (Q_e), OD e DBO nos esgotos

De maneira geral, segundo Sperling (1996), a produção de esgotos corresponde aproximadamente ao consumo de água. Porém, a fração de esgotos que chega à rede coletora pode variar. Foi considerada na modelagem a vazão de esgoto dos municípios de São Lourenço da Mata e Camaragibe. Para a vazão dos municípios, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$Q_e = \frac{QPC \times Pop \times R}{1000} / 86400$$

Onde: Q_e é a vazão doméstica média de esgotos (m^3/s);
 QPC é a cota per capita de água (para uma cidade média = 170 l/hab.d);
 R é o coeficiente de retorno.

O cálculo da população média dos municípios entre os anos de 2001 e 2008 foi realizado a partir de dados do IBGE (2000) e CONDEPE (2007) conforme mostra a **tabela 3**. Já o cálculo da vazão no matadouro de São Lourenço da Mata, que também contribui com esgoto, foi realizado a partir do número de cabeças de gado, porcos e cabritos abatidos por dia, levando-se em consideração que a alta estação de abate se encontra entre os meses de outubro e dezembro. O cálculo da vazão de esgoto do matadouro bem como da concentração de DBO, utilizando dados da CETESB (2008) e de Sperling (1996) é mostrado na **tabela 4**. Em relação ao OD e à DBO, considerou-se os valores de **0 mg/l** e **300 mg/l**, respectivamente (SPERLING, 2007).

Tabela 3. Cálculo da vazão média de esgoto doméstico dos municípios

Taxa média de crescimento urbano	0,012	0,01
População Urbana	Camaragibe*	São Lourenço da Mata*
2000	105935	68325
2001	107206	69008
2002	108493	69698
2003	109795	70395
2004	111112	71099
2005	112445	71810
2006	113795	72528
2007	115160	73254
2008	116542	73986
Média	111819	71472
Vazão média de Esgoto (m^3/s)	0,1760	0.1125

* Foram contabilizados os domicílios urbanos que lançam seus esgotos no rio, exceto aqueles que declararam possuir fossa séptica como solução para tratamento de efluentes (CONDEPE, 2007)

Tabela 4. Cálculo da vazão média de esgoto e da concentração de DBO do matadouro no período seco

Quantidade média de Cabeça (d)			Carga média de DBO produzida (KgDBO/d)			Carga Total (KgDBO/d)	Vazão média de esgoto (m3/d)			Vazão Total (m3/s)	Concentração de DBO (mg/l)
Bois	Porcos	Cabritos	Bois	Porcos	Cabritos		Bois	Porcos	Cabritos		
51	18	15	140,76	12,42	10,35	163,53	17,9	2,52	2,10	0,000260	7277,70

OD, DBO e temperatura do rio, ao longo do trecho.

Os dados médios observados de OD, DBO e temperatura nos meses de estiagem ao longo do trecho estudado foram obtidos através dos postos de monitoramento da qualidade CB-60, CB-71, CB-72 e CB-80 da CPRH, que realiza coleta e análise da água a cada dois meses. Consta-se um aumento considerável nos teores de DBO a partir do posto CB-72, indicando a existência de lançamentos de esgoto bruto no local que vêm contribuindo para o aumento da quantidade de matéria orgânica presente no rio Capibaribe. A **tabela 5** apresenta os valores médios de OD, DBO e temperatura para os meses de Outubro, Dezembro e Fevereiro.

Tabela 5. Valores médios de OD, DBO e temperatura nos postos de qualidade da CPRH

OD (mg/l)				DBO (mg/l)				Temperatura (°C)			
CB-60	CB-71	CB-72	CB-80	CB-60	CB-71	CB-72	CB-80	CB-60	CB-71	CB-72	CB-80
3,3	4,5	3,1	4,5	2,1	2,2	5,0	4,2	28	28	29	29

Segundo Sperling (2007), os teores de oxigênio mínimo dissolvido a serem mantidos nos corpos d'água são estipulados através da legislação aplicável no país ou na região. No Brasil, os valores variam em função da classe em que o corpo d'água está enquadrado. Os teores mínimos permissíveis de OD e máximos de DBO nos corpos d'água doce em função da classe a que pertencem estão apresentados na **tabela 6**, segundo a Resolução CONAMA 357/2005.

Tabela 6. Teores mínimos de OD e máximos DBO permissíveis (Resolução CONAMA 357/2005).

Fonte: Sperling (2007)

Classe	OD mínimo (mg/L)	DBO máxima (mg/L)
Especial	Não são permitidos	Não são permitidos
	lançamentos, mesmo tratados	lançamentos, mesmo tratados
1	6,0	3,0
2	5,0	5,0
3	4,0	10,0
4	2,0	-

Quando há ausência de enquadramento, como é o caso do rio Capibaribe, conforme a Resolução CONAMA 357/2005, o rio deve ser enquadrado como de Classe 2. Portanto, o teor mínimo de OD e máximo de DBO no rio deve ser de 5,0 mg/L.

Velocidade de percurso (v) e profundidade do rio (H)

Os dados históricos de velocidade e profundidade do rio foram obtidos no site da ANA, através do Sistema de Informações Hidrológicas - *Hidroweb*, da Agência Nacional de Águas e tratados no software *Hidro 1.2*, também disponibilizado por esta agência. Pelo posto fluviométrico de Paudalho, a montante do trecho modelado, obteve-se os valores históricos de velocidade e profundidade e com esses dados foi realizada uma estimativa da velocidade e profundidade através da correlação com a vazão observada no posto fluviométrico localizado no trecho estudado (**Figuras 5 e 6**), conforme indicado por Sperling (2007), quando se deseja estimar a velocidade da massa líquida num curso d'água.

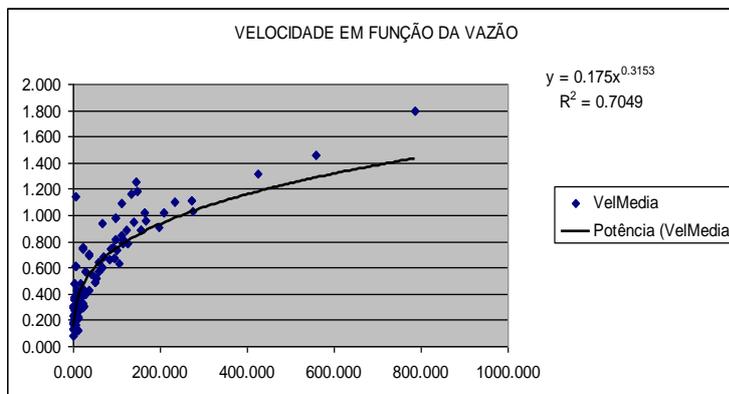


Figura 5. Gráfico de correlação da velocidade em função da vazão

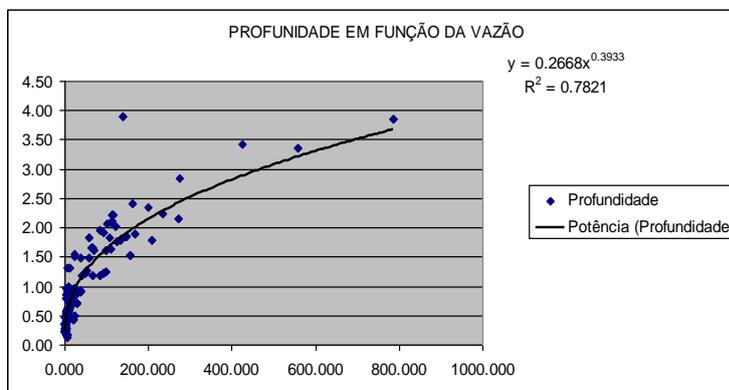


Figura 6. Gráfico de correlação da profundidade em função da vazão

Determinação dos coeficientes iniciais K_1 , K_d , K_s e K_2

Conforme Ide e Ribeiro (2008), a calibração do modelo é realizada pelo ajuste de coeficientes, que podem variar dentro de faixas determinadas, permitindo adequar as equações matemáticas às realidades físicas da área de estudo.

Mancuso e Santos (2003) afirmam que o coeficiente K_1 representa a taxa de decomposição da matéria orgânica biodegradável, a qual, por sua vez, depende de uma série de fatores físicos, químicos e biológicos. Entre tais fatores destacam-se principalmente a temperatura e a composição do efluente. O coeficiente K_d é a incorporação da decomposição da matéria orgânica pela biomassa suspensa na massa líquida, bem como pela biomassa no lodo de fundo. O K_s representa o quociente entre a velocidade de sedimentação do material orgânico sedimentável (DBO sedimentável) e a profundidade do rio (CHAPRA *apud* SPERLING, 2007). A determinação dos três coeficientes foi feita de acordo com valores tabelados (tabela 7).

Tabela 7. Valores típicos dos coeficientes de remoção de DBO (K_1 e K_d) (base e, 20°C)

Fonte: FAIR *et al* (1973), ARCEIVALA (1981), *apud* Sperling (2007)

Origem	K1	Rios rasos			Rios profundos		
		Decomp. Kd	Sediment. Ks	Remoção Kr (=Ks+kd)	Decomp. Kd	Sediment. Ks	Remoção Kr (=Ks+kd)
Curso d'água recebendo esgoto bruto concentrado	0,35 - 0,45	0,50 - 1,00	0,10 - 0,35	0,60 - 1,35	0,35 - 0,50	0,05 - 0,20	0,40 - 0,70
Curso d'água recebendo esgoto bruto de baixa concentração	0,30 - 0,40	0,40 - 0,80	0,05 - 0,25	0,45 - 1,05	0,30 - 0,45	0,00 - 0,15	0,30 - 0,60
Curso d'água recebendo efluente primário	0,30 - 0,40	0,40 - 0,80	0,05 - 0,10	0,45 - 0,90	0,30 - 0,45	0,00 - 0,05	0,30 - 0,50
Curso d'água recebendo efluente secundário	0,12 - 0,24	0,12 - 0,24	-	0,12 - 0,24	0,12 - 0,24	-	0,12 - 0,24
Curso d'água com águas limpas	0,08 - 0,20	0,08 - 0,20	-	0,08 - 0,20	0,08 - 0,20	-	0,08 - 0,20

O trecho modelado é considerado raso e recebe esgoto bruto concentrado, portanto os valores médios iniciais de K_1 , K_d e K_s são, respectivamente, **0,4**, **0,75** e **0,22**, a 20°C. Já o K_2 é o **coeficiente de**

reaeração, e depende da difusividade do oxigênio na água e da intensidade da turbulência do escoamento, aumentando seu valor, quanto mais intensa for a turbulência. O coeficiente K_2 também é tabelado, conforme a **tabela 8**. Estes valores foram tomados como ponto de partida para a calibração do modelo, visando obter coeficientes mais condizentes com a realidade da bacia, que levem a menor diferença entre os dados de qualidade observados e estimados pelo modelo.

Tabela 8. Valores típicos de K_2 (base e, 20° C).
Fonte: Sperling (2007)

Origem	K_2 (d ⁻¹)	
	Profundo	Raso
Pequenas lagoas	0,12	0,23
Rios vagarosos, grandes lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixa velocidade	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Rios rápidos	0,69	1,15

Calibração dos coeficientes do modelo QUAL-UFMG

Todos os dados iniciais obtidos foram introduzidos na planilha QUAL-UFMG. Após o preenchimento da planilha foi realizada a calibração do modelo, uma das etapas mais difíceis da modelagem. Para Sperling (2007), a calibração consiste em obter um bom ajuste entre os dados observados e estimados (calculados pelo modelo) por meio da variação dos coeficientes do modelo. Segundo Reis (2006), a calibração depende de uma combinação de dados hidráulicos, hidrológicos e de qualidade da água. Assim, é uma atividade que demanda tempo e certa estrutura de apoio de campo, laboratorial e computacional.

Sperling (2007) mostra que a calibração pode ser realizada de duas formas: **manualmente**, variando os valores dos parâmetros de forma que a soma dos quadrados dos erros diminua, até que se obtenha um ajuste satisfatório, ou de forma **automatizada**, por meio de métodos de otimização que faça a busca entre possíveis valores dos coeficientes e conduza à menor soma dos quadrados dos erros. Para a modelagem no Capibaribe foi realizada as duas formas de calibração, para posterior comparação de qual metodologia mostrou-se mais adequada.

Primeiramente foi utilizada a calibração automatizada, através da ferramenta *Solver* do Excel, muito utilizada para otimização e solução de equações. Depois foi realizada a calibração manual, na qual o trecho foi dividido em três, separados pelos postos de monitoramento da qualidade, para assim se obter valores adequados à cada situação. Foi utilizado para as duas calibrações o **Coefficiente de Determinação (CD)** para indicar o método mais adequado. Este é um dos indicadores estatísticos mais úteis de ajuste dos dados estimados aos dados observados, sendo expresso como:

$$CD = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obsméd})^2}$$

Onde: Y_{obs} é o valor observado;
 Y_{est} é o valor estimado;
 $Y_{obsméd}$ é a média dos valores observados.

Os valores de CD podem variar entre $-\infty$ e **+1**. CD igual a 1 indica perfeito ajuste entre os dados observados e estimados.

Para a calibração do modelo, viu-se necessária a distribuição da carga orgânica em vários afluentes, devido ao lançamento de esgoto doméstico dos municípios ao longo do rio, levando em consideração que estes escoam por canais de drenagem ou afluentes que contribuem para a vazão do Capibaribe neste trecho. O *Google Earth* foi de grande auxílio nesta etapa de identificação dos pontos de contribuição.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração

Tomando-se como critério o coeficiente de determinação, a calibração manual mostrou-se bem mais eficiente que a automatizada, visto que esta apenas obtém um valor médio constante ao longo do trecho, o que não ocorre na realidade. A calibração manual obteve, para cada trecho, um valor para K_1 , K_d , K_s e K_2 , conforme mostra a **tabela 9**.

Tabela 9. Valores de K_1 , K_d , K_s e K_2 obtidos através da calibração manual do modelo para os três trechos.

	K_1	K_d	K_s	K_2
CB-60 /CB-71	0.30	0.10	0.18	1.60
CB-71 /CB-72	1.10	14.00	3.20	12.35
CB-72 /CB-80	0.90	2.45	0.18	4.60

Com a calibração manual, observou-se uma boa concordância entre os valores estimados e observados tanto para a DBO quanto para o OD, conforme é mostrado nas **figuras 7 e 8**.

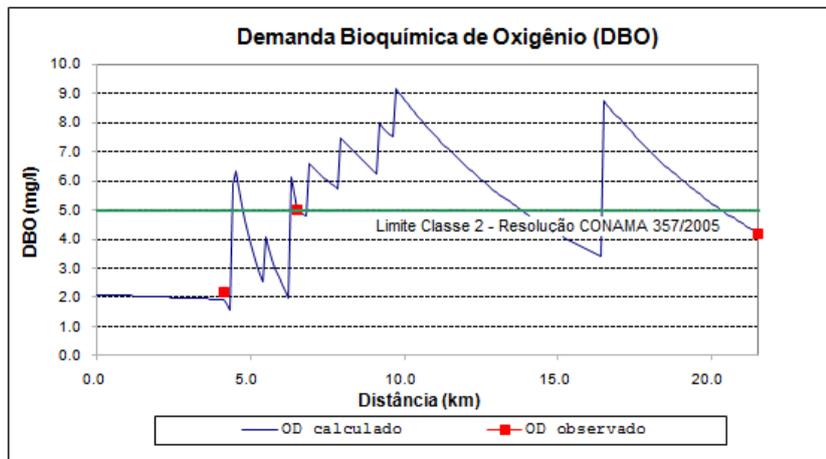


Figura 7. Calibração de DBO para o trecho entre CB-60 e CB-80

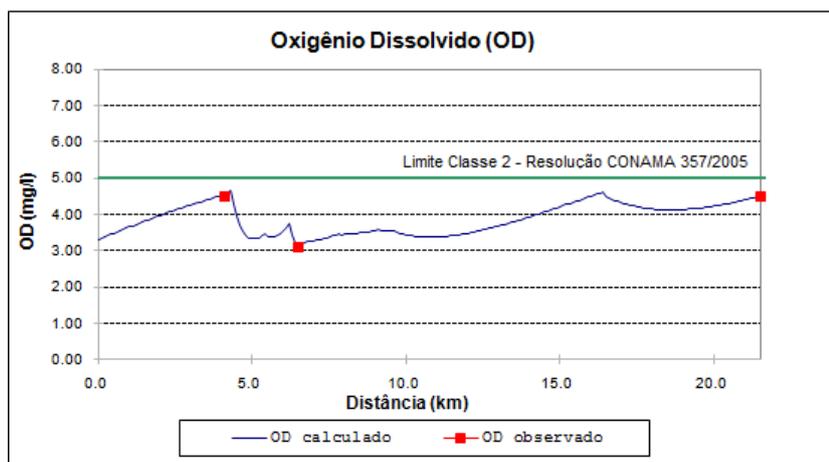


Figura 8. Calibração de OD para o trecho entre CB-60 e CB-80

Também foi determinado o percentual da extensão do trecho que atende à Resolução CONAMA 357/2005, representado pela **figura 9**. Nota-se que em nenhum momento do trecho o teor de OD atingiu o

valor de **5,0 mg/l**, que é o mínimo valor de concentração permitido para um corpo hídrico de **classe 2**. Já a concentração de DBO se encontra **45,6%** do trecho dentro dos padrões.

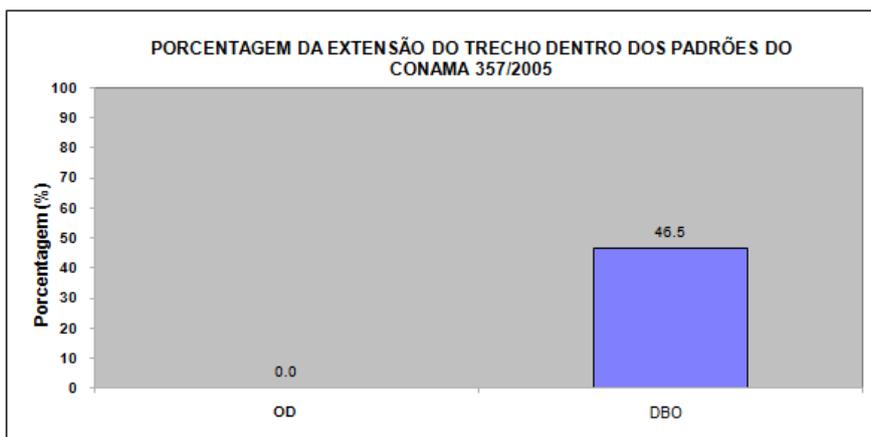


Figura 9. Porcentagem da extensão do trecho que se encontra dentro dos padrões do CONAMA 357/2005.

Validação

Segundo Oppa (2007), a validação é utilizada como uma verificação do modelo já calibrado, utilizando uma série de dados diferente daquela utilizada na calibração. A calibração do modelo é adequada quando os valores observados forem semelhantes no decorrer da série. A validação foi realizada utilizando os dados do período seco do ano de 2009. As **figuras 10 e 11** mostram o resultado da validação da DBO e do OD.

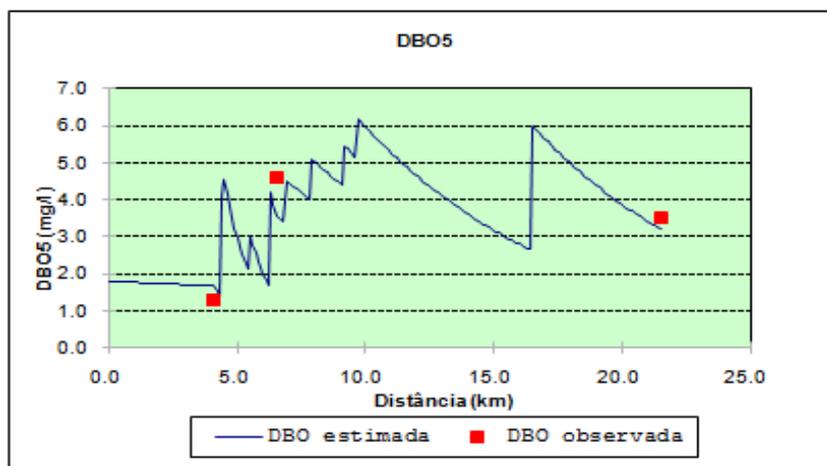


Figura 10. Validação da DBO para o ano de 2009

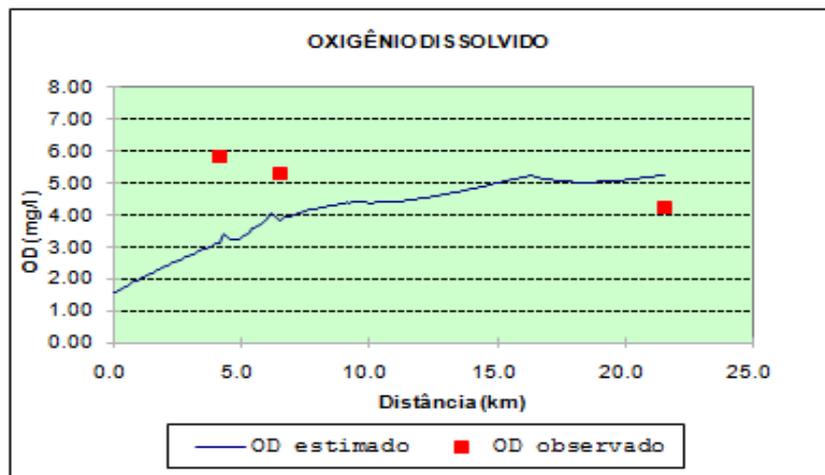


Figura 11. Validação do OD para o ano de 2009

O resultado da validação dos parâmetros mostra como os coeficientes do modelo influenciam na resposta do sistema. A validação mostrou-se bem satisfatória para a DBO, visto que o coeficiente de decomposição (K_d), que é o fator mais importante na calibração da DBO é pouco sensível à variações, permitindo assim uma maior facilidade de validação. Já o coeficiente de reaeração (k_2), por ser o coeficiente mais sensível, torna cada ano uma situação específica. Dessa forma, a validação foi menos satisfatória que a da DBO.

CONCLUSÃO

Este trabalho evidenciou a necessidade de obtenção de dados mais consistentes na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, além do aumento de postos de monitoramento da qualidade da água e de vazão, de forma que possa simular cenários ainda mais próximos às condições reais do rio. Mas que, apesar da necessidade de se trabalhar com médias, o modelo mostrou-se bem representativo para o período estudado.

A utilização de Sistema de Informações Geográficas e imagens do *Google Earth* foram de fundamental importância para obtenção de dados de entrada para o modelo, principalmente na definição das contribuições ao longo do trecho estudado.

Os resultados mostram claramente que o rio Capibaribe, mesmo no período de estiagem, possui uma boa capacidade de autodepuração neste trecho, mas devido à grande quantidade de esgoto lançado, não consegue encontrar um equilíbrio, visto que em nenhum momento o teor de oxigênio dissolvido alcançou o limite mínimo permissível.

É inquestionável a necessidade de intervenções na área no que diz respeito ao controle da poluição das águas, principalmente a coleta e tratamento dos esgotos domésticos de São Lourenço da Mata e Camaragibe. Devem ser tomadas medidas de caráter preventivo e corretivo, para que possam diminuir as consequências desta poluição.

Com uma boa calibração, os modelos de qualidade da água são de grande auxílio nos momentos de definição de estratégias de gestão dos recursos hídricos e sempre deveriam fazer parte dos estudos de concessão de outorga e de cobrança pelo uso da água, por serem capazes de antever e avaliar alterações na qualidade da água advindas de novos empreendimentos na bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. *Hidroweb*. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>.

BARROS, A.M.L. **Modelagem da poluição pontual e difusa: Aplicação do modelo MONERIS à Bacia Hidrográfica do rio Ipojuca/Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Curitiba, 2006.

BRAGA, B.; BARROS, M. T. L.; CONEJO, J. G. L.; EIGER, S.; HESPANHOL, I.; JULIANO, N.; NUCCI, N.; PORTO, M.; SPENCER, M. **Introdução à Engenharia Ambiental**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Agência Nacional de Águas – ANA. **A Evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil = The evolution of water resources management in Brazil**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2002. 64 p. (Edição comemorativa do Dia Mundial da Água)

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. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/L9433.htm>>. Acesso em: 20/12/2010.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de Março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>> Acesso em 17/nov/2010.

CAMPOS, N; STUART, T. **Gestão das águas: Princípios e práticas**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

- CETESB. **Guia Técnico Ambiental de Abate (Bovino e Suíno)**. 2008. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 02/12/2010
- CONDEPE. **Demografia**. 2007. Disponível em: <<http://www.bde.pe.gov.br/>>. Acesso em: 12/12/2010.
- IBGE. **Censo Populacional**. 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 12/Nov/2010.
- IDE, W. R. RIBEIRO, M.L. **Calibração do modelo de qualidade de água QUAL-UFMG para o rio Taquarizinho em período de estiagem**. 2008.
- MANCUSO, P.C.S.; SANTOS, H. F. **Reúso da água**. Barueri, São Paulo: Manole, 2003.
- MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 416 p.
- OPPA, L.F. **Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do rio Vacaraí Mirim**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Santa Maria. 2007.
- PERNAMBUCO (2002). Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Capibaribe – PE**.
- POLETO, C. (org). **Introdução ao gerenciamento ambiental**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 354 p.
- RAMOS, A. **Expedição Capibaribe: Uma Ação Sócio-Cultural e Ambiental no Rio Capibaribe**. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE COMITÊS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS, Foz do Iguaçu, PR, 23-27 de outubro de 2007. Disponível em: <<http://www.rebob.org.br/9encontro-foz->>. Acesso em: 20/11/2010.
- REIS, J. S. A. **Modelagem matemática da qualidade de água para o Alto Rio das Velhas/ MG**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. 2009.
- VON SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2ª Ed. Vol. 1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 243 p. 1996.
- VON SPERLING, M. V. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.
- SRHE. **Plano Hidroambiental do Rio Capibaribe. 2010**. Disponível em: <<http://www.sirh.srh.gov.br/hidroambiental/>>. Acesso em: 29/11/2010.
- STREETER, H.W; PHELPS, E.B. **A study of the pollution and natural purification of the Ohio River**. Public Health Bulletin, Washington. 1925.
- TUCCI, C.E.M (Org). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.