

Modelo de Auxílio à Tomada de Decisões em Processos de Despoluição de Bacias Hidrográficas

Rinaldo César de Carvalho

Departamento de Matemática – DMAT – UFPR
prof_rinaldo@ufpr.br

Eloy Kaviski

Departamento de Hidráulica e Saneamento – DHS – UFPR
eloy.dhs@ufpr.br

Recebido: 02/03/07 - revisado: 04/08/07 - aceito: 20/11/09

RESUMO

O presente artigo apresenta um ferramental de auxílio à tomada de decisões quanto à aplicação de medidas de despoluição hídrica mediante o uso de análise matemática com base nos algoritmos genéticos. Buscou-se otimizar a sequência de investimentos necessários para aproximar os rios de suas condições de enquadramento. Para solucionar o problema de otimização empregou-se o programa EVOLVER 4.0.8 da Palisade Corporation, um adendo ao Microsoft Excel para a resolução de algoritmos genéticos. Acoplado a este software foi utilizado o programa ADV_DIF, desenvolvido para o presente estudo, com o objetivo de determinar a concentração de poluentes ao longo do rio. O método proposto foi aplicado na bacia do Rio Palmital, que faz parte da bacia do Altíssimo Iguaçu. Os resultados obtidos demonstram sua potencialidade, sendo suficientes para cumprir o objetivo estabelecido.

Palavras-chave: Otimização, algoritmo genético, despoluição de bacias hidrográficas.

INTRODUÇÃO

Uma análise matemática de investimentos em processos de despoluição de bacias hidrográficas justifica-se pelo grande valor e utilidade dos recursos hídricos. A evolução dos sistemas de análise em gerenciamento das águas e os avanços em programação computacional têm permitido consideráveis simplificações no uso de modelos de simulação. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um ferramental de auxílio à decisão quanto aos investimentos necessários em medidas de despoluição hídrica, mediante o uso de análise matemática com base nos Algoritmos Genéticos. Para tanto se faz necessário analisar as características pertinentes à determinação da qualidade da água, identificar custos e benefícios envolvidos na aplicação das medidas de despoluição, identificar a matriz das fontes de poluição do objeto de estudo e executar um modelo de simulação capaz de fornecer resultados para análise.

Nas bacias hidrográficas, devido à diversidade de usos dos recursos, a qualidade da água tende a diminuir e, por vezes, atingir estados abaixo dos

padrões estipulados pela legislação, podendo ameaçar seu ecossistema e comprometer a saúde de seus usuários. Uma maneira de restaurar a qualidade das águas da bacia é fazer uso de medidas de despoluição hídrica (MDH). Essas medidas podem ser estruturais, representadas por obras civis, ou de gestão, não-estruturais, representadas, basicamente, por investimentos em educação e fiscalização. A aplicação das medidas pode trazer benefícios, em termos de despoluição, a um certo custo. Assim, os recursos financeiros devem ser utilizados da melhor forma possível, atendendo a critérios previamente especificados, de modo a se obter o máximo de benefícios, representados por uma remoção eficaz de poluentes.

A proposta de um modelo com base nos algoritmos inteligentes vem auxiliar na busca do conjunto de MDH capaz de gerar a máxima remoção de poluentes, com o uso dos recursos financeiros disponíveis, dentro de um tempo de projeto pré-definido. O objetivo não seria atingir o enquadramento dos rios, mas sim deixá-los com a melhor qualidade possível, indicando o caminho a ser seguido, através da utilização de um certo valor fixo

para investimento. Realizando-se estudos para uma lista de possíveis investimentos podem ser realizadas análises técnicas, econômicas e políticas sobre o manancial investigado.

MÉTODO PROPOSTO

O método proposto é apresentado através da solução de um exemplo hipotético, descrito na seqüência.

Considera-se uma bacia hidrográfica (fig. 1), onde estão sendo aplicados os conjuntos de medidas de despoluição M_1, M_2, M_3 e M_4 , nos pontos X_1, X_2, X_3 e X_4 , respectivamente, distribuídos ao longo de sua extensão.

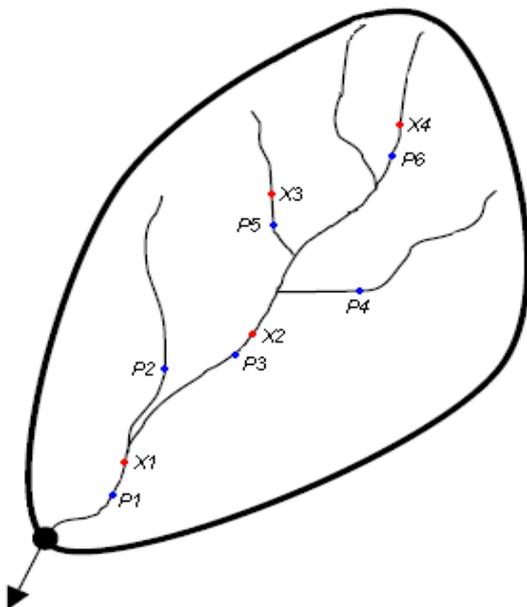


Figura 1 - Diagrama esquemático de uma bacia hidrográfica.

Observa-se que, apesar da possibilidade de aplicações parciais das medidas de despoluição, no presente exemplo, por questões de simplificação, as medidas apenas serão consideradas como executadas ou não. Assim, cada conjunto M_i ($i = 1$ a 4) é composto por m_j ($j = 1$ a 5) medidas de despoluição, de acordo com a tabela 1, apresentada a seguir, onde o "1" representa a aplicação e o "0" a não aplicação da medida m_j .

O objetivo da aplicação de cada conjunto M_i é produzir uma redução na concentração de poluentes. A variação dessa concentração deve ser verificada com o uso de parâmetros de qualidade da água, em P_s ($s = 1$ a 6) pontos de avaliação pré-definidos, distribuídos estrategicamente ao longo da bacia, de forma a coincidir com os pontos de captação dos principais usuários, em locais que representem da melhor forma possível a bacia como um todo.

Tabela 1 - Conjuntos de medidas de despoluição.

Medidas (m_j)	Conjuntos de medidas (M_i)			
	M_1	M_2	M_3	M_4
m_1	1	0	0	1
m_2	0	1	0	1
m_3	0	1	1	1
m_4	1	1	0	0
m_5	0	0	1	0

Organizando-se as variáveis em forma de equações, resulta:

$$\begin{cases} M_1 = m_1 + m_4 \\ M_2 = m_2 + m_3 + m_4 \\ M_3 = m_3 + m_5 \\ M_4 = m_1 + m_2 + m_3. \end{cases} \quad (1)$$

Dessa forma, para o exemplo em questão, observa-se que a qualidade da água no ponto de avaliação P_6 é afetada somente pelo conjunto de medidas M_4 ; no ponto P_5 pelo conjunto M_3 ; no ponto P_3 pelos conjuntos M_2, M_3 e M_4 ; e que no ponto P_1 sofre influência de todos os conjuntos de MDH aplicados. Nos pontos P_2 e P_4 , a água não tem suas características alteradas pela aplicação das MDH. Observa-se que, muito embora o ponto P_1 pareça ser o mais beneficiado em termos de tratamento, pois a água que o atinge tem seu estado melhorado continuamente durante o trajeto, sua qualidade depende ainda dos despejos realizados

durante esse percurso, o que pode alterar brutalmente suas características. Demonstra-se, com isso, a interdependência dinâmica entre a aplicação dos conjuntos de medidas de despoluição, os usos dos recursos e os pontos de avaliação dos parâmetros de qualidade da água.

Pode-se escrever a transformação linear das m_j medidas isoladas no conjunto M_i de medidas de despoluição. Ou seja, o vetor conjunto de medidas é obtido através do produto entre o vetor medidas de despoluição e a matriz das aplicações, em notação matricial, representado por:

$$M_i = A \cdot m_j, \quad (i = 1, \dots, 4 \text{ e } j = 1, \dots, 5), \quad (2)$$

sendo $A = [a_{ij}]$, onde os termos a_{ij} podem ter valor zero ou um, de acordo com o seguinte critério:

- a) $a_{ij} = 1$, quando a medida m_j pertence ao conjunto M_i ;
- b) $a_{ij} = 0$, quando a medida m_j não pertence ao conjunto M_i .

Assim, no caso de 4 conjuntos de medidas que utilizam 5 medidas na sua composição, resulta:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Ajustando os valores de $A = [a_{ij}]$ para a combinação do exemplo em questão, tem-se:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Cabe, porém, lembrar que, num processo de despoluição, as medidas podem ser aplicadas aos poucos, de maneira distribuída, acompanhando a evolução do projeto. Assim, no método proposto, serão consideradas utilizações parciais, representando, além dos valores extremos 0 e 1, todos os demais situados neste intervalo, correspondendo à porcentagem de aplicação de cada medida m_j .

Convém salientar que um processo de despoluição pode ser realizado em mais de uma etapa, sendo que cada etapa, por sua vez, pode ser composta por um ou mais conjuntos de medidas de despoluição hídrica, e que o número de conjuntos de medidas aplicadas em cada etapa depende do número de pontos de aplicação adotados.

Generalizando-se para i conjuntos de j medidas de despoluição, aplicadas em h pontos, na primeira etapa de um processo realizado em p etapas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{21} \\ \vdots \\ M_{m1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

ou, ainda, simplesmente

$$M_{i1} = A \cdot m_j. \quad (6)$$

Para a segunda etapa, tem-se:

$$\begin{bmatrix} M_{12} \\ M_{22} \\ \vdots \\ M_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

e, assim, sucessivamente até ser completada a última etapa (p) do processo de despoluição,

$$\begin{bmatrix} M_{1p} \\ M_{2p} \\ \vdots \\ M_{mp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Generalizando-se para M_i conjuntos formados pela combinação de m_j medidas de despoluição, aplicadas em X_h pontos de aplicação, na k -ésima etapa do processo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} M_{1k} \\ M_{2k} \\ \vdots \\ M_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Ou, em notação matricial, simplesmente:

$$M_{ik} = A \cdot m_j, \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \text{ e } k = 1, \dots, p) \quad (10)$$

CUSTOS

Os custos associados aos conjuntos de medidas representam o capital empregado na sua instalação e manutenção, quando necessária. Esses valores são função direta da quantidade da medida aplicada, pois uma medida pode ser realizada para diferentes dimensionamentos, variando tanto seu custo quanto o benefício gerado. Os custos não devem ultrapassar o capital disponível para cada etapa do projeto, nem apresentar valores negativos, visto que representam retiradas de dinheiro. Da mesma forma, o seu somatório não pode ultrapassar o total previsto para o projeto, assim:

$$0 \leq \sum_{i=1}^m C_i \leq R, \quad (11)$$

onde:

C_i = custo de aplicação de cada conjunto de medidas M_i ;

R = recursos financeiros disponíveis, representam o valor total no presente a ser aplicado gradualmente, em cada etapa do projeto.

Em cada etapa, o custo total será determinado pelo somatório dos custos de todas as medidas adotadas em cada conjunto. Para M_i conjuntos formados pela combinação de m_j medidas de despoluição, aplicadas em X_H pontos de aplicação, na k -ésima etapa do processo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} C_{1k} \\ C_{2k} \\ \vdots \\ C_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix}, \quad (12)$$

ou, em notação matricial, simplesmente

$$C_{ik} = A \cdot c_j, \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \text{ e } k = 1, \dots, p). \quad (13)$$

Muito embora, na prática, possam existir diferenças nos valores dos custos das medidas em função do local de sua aplicação, por questão de simplificação e pela não disponibilidade de dados, optou-se por considerar seus valores como fixos, independentemente do local da aplicação das medidas.

BENEFÍCIOS

Quantificação dos benefícios de cada MDH

Na determinação do modelo, uma questão complexa é a que envolve a obtenção dos benefícios gerados com a utilização das medidas de despoluição. Algumas considerações serão feitas a esse respeito de forma a tornar factível o método utilizado.

Cada medida de despoluição m_j aplicada a um corpo hídrico gera um benefício b_j , avaliado em termos da redução da carga de poluentes, sendo tanto maior quanto maior for a capacidade de remoção dessa carga. O benefício gerado pela aplicação individual de MDH nos pontos de avaliação será considerado como sendo função da variação na concentração de poluentes e do peso do parâmetro de qualidade da água (PQA) utilizado, representado a seguir:

$$b_{jk} = \sum_{x=1}^t \Delta W_x \cdot q_x, \quad (14)$$

onde:

b_{jk} = benefício gerado no ponto de avaliação P_S devido à implantação da MDH m_j , na k -ésima etapa do processo de despoluição;

ΔW_x = redução na concentração do parâmetro de qualidade x ($x = 1$ a t), no P_S ;

q_x = peso relativo do PQA.

Os pesos relativos dos PQA considerados na formulação matemática acima devem necessariamente somar um (1) num mesmo ponto de aplicação. Ou seja,

$$\sum_{x=1}^t q_x = 1. \quad (15)$$

Cabe lembrar que o benefício gerado por cada MDH deve assumir um valor não-negativo, visto que representa uma melhoria. Um valor negativo representaria diminuição na qualidade da água, o que seria contraditório e inviabilizaria a aplicação das medidas de despoluição. Assim,

$$b_{jk} \geq 0. \quad (16)$$

Como as condições do corpo hídrico dependem das ações realizadas nas etapas anteriores, de forma dinâmica, com o decorrer do processo as

cargas de poluentes tendem a diminuir de forma não-linear. Será adotado um fator de redução exponencial da capacidade de remoção de poluentes (δ), a partir da segunda etapa, de forma a ajustar o benefício gerado por cada MDH ao longo do processo, da seguinte forma:

$$b_{jk} = \delta^{k-1} \cdot b_{j1}, \quad (17)$$

onde:

δ = fator de redução da capacidade de remoção de poluentes da MDH m_j , ($0 < \delta < 1$).

Quantificação dos benefícios de cada conjunto de MDH

O benefício gerado pelo conjunto de medidas não deve ultrapassar o necessário para enquadrar o rio dentro da sua classe, o que impõe um limite superior teórico na quantidade de medidas aplicadas. Todavia, na prática, observa-se que atingir os níveis exigidos pela legislação é uma tarefa muito difícil e, às vezes, impossível de se realizar.

Analogamente aos custos, em cada etapa o benefício total será determinado pelo somatório dos benefícios de todas as medidas adotadas em cada conjunto. Porém, os benefícios gerados pela implantação de cada conjunto de medidas de despoluição devem levar em conta a importância do uso dos recursos. Isto será considerado através da adoção de pesos relativos atribuídos em cada um dos pontos de avaliação. A capacidade de remoção de poluentes (eficiência), expressa em porcentagem pelo escalar α_i ($i = 1$ a 4), será, então, associada a cada ponto de aplicação X_{ij} . Seu valor não poderá obviamente ultrapassar a unidade, que corresponde a 100%.

Assim, no exemplo apresentado, cada ponto de aplicação terá um valor relativo à capacidade de remoção, independente da medida aplicada, conforme indica a tabela 2.

Tabela 2 - Valor relativo de cada ponto de aplicação.

Pontos de Aplicação	X_1	X_2	X_3	X_4
Valor associado (α_i)	50%	60%	75%	75%

Em notação matricial, os valores da capacidade de remoção de poluentes (α_i) podem ser representados pela matriz diagonal Δ , representada a seguir,

$$\Delta = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_4 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Os benefícios podem ser representados da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Substituindo-se os valores de α_i pelos valores da tabela, tem-se:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,75 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,75 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Generalizando para M_j conjuntos formados pela combinação de m_j medidas de despoluição, na k -ésima etapa de um processo realizado em p etapas, e, levando-se em conta a importância do ponto de aplicação X_{ij} dessas medidas, independentemente de qual medida for aplicada neste ponto, tem-se:

$$\begin{bmatrix} B_{1k} \\ B_{2k} \\ \vdots \\ B_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}, \quad (21)$$

ou, em notação matricial, simplesmente

$$B_{ik} = \Delta \cdot A \cdot b_j, (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \text{ e } k = 1, \dots, p) \quad (22)$$

Método do valor presente

Como os resultados dos parâmetros B_{ik} representam os benefícios obtidos pela aplicação dos conjuntos de MDH em cada etapa do projeto, propõe-se, para que seja possível comparar os resultados, a utilização do Método do Valor Presente. Este método consiste em se calcular o valor presente relativo a cada etapa do processo, de acordo com a expressão a seguir, e somá-lo ao investimento inicial de cada alternativa (Casarotto e Kopittke, 1987).

$$VP_{ik} = \sum_{T=1}^a \frac{B_{ikT}}{(1+d)^T}, \quad (23)$$

onde:

VP_{ik} = valor presente do parâmetro de benefício B;

d = taxa de desconto;

T = unidade de tempo;

a = número de períodos.

FUNÇÃO OBJETIVO

O problema em questão consiste em maximizar a função benefício, sujeito a restrições de ordem financeira, viabilidade física, entre outras, dependendo dos locais de aplicação, das medidas aplicadas e do número de etapas necessárias. O objetivo consiste em aumentar o benefício em termos de despoluição total da bacia.

$$\text{Max } B = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (24)$$

onde:

B = função de benefício total da bacia.

Alternativamente, é possível formular a função objetivo em termos da concentração de poluentes onde, ao invés de se buscar a maximização do benefício, busca-se a minimização dessa concentração, representada por:

$$\text{Min } c = \sum_{x=1}^t c'_x \cdot q_x, \quad (25)$$

onde:

c'_x = concentração de poluentes após a aplicação dos conjuntos de medidas;

q_x = peso relativo do PQA x.

Neste estudo, o parâmetro de qualidade da água analisado foi a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que Tchobanoglous e Schroeder (1987) definem como sendo a quantidade de oxigênio necessária para a metabolização da matéria orgânica biodegradável existente no meio aquático. Justifica-se esta escolha, pois, dentre os constituintes mais importantes encontrados nos corpos hídricos, o oxigênio dissolvido ocupa posição de destaque. Isto se dá em primeiro lugar pela razão óbvia de que o oxigênio é fundamental para a manutenção de formas de vida aeróbicas importantes não só para o equilíbrio ambiental, mas também como fonte de alimentos para o homem (Branco et al., 1991).

Embora o conceito de DBO não seja adequado como medida única de avaliação do impacto de poluentes, ele possibilita uma avaliação importante do estado de qualidade da água. Cabe lembrar que a DBO referida corresponde à oxidação metabólica da matéria orgânica, da qual resulta o gás carbônico (CO_2), água (H_2O) e amônia (NH_3), conhecida como DBO carbonácea. A concentração de oxigênio dissolvido na água é resultado de um balanço entre as quantidades produzidas, consumidas e injetadas, e a massa que resulta no meio. Conhecendo-se essas quantidades produzidas e consumidas, um balanço de massa possibilita a obtenção de uma equação diferencial para o cálculo do teor de oxigênio dissolvido na água. Portanto, na determinação do benefício em termos de despoluição hídrica, a DBO desempenha importante papel como parâmetro de qualidade da água.

A avaliação dos resultados, em termos da redução na concentração de poluentes, necessária no estudo de caso, foi alcançada com o uso de um programa de computador, desenvolvido para o presente trabalho em linguagem Turbo Pascal 7.0, denominado ADV_DIF. Este programa funciona acoplado ao Evolver 4.0.8, utilizando como dados de entrada os resultados do algoritmo genético, e fornecendo ao Evolver, por sua vez, seus resultados, num ciclo contínuo.

ALGORITMO GENÉTICO

Algoritmos genéticos são modelos de otimização que tem como base a evolução dos seres vivos. Seus primeiros estudos foram desenvolvidos nos anos setenta por John Holland (1975) na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, que ficou impressionado com a facilidade com a qual os siste-

mas biológicos evoluíam, podendo realizar tarefas que escapavam até dos mais poderosos supercomputadores. Essa evolução produz sistemas com capacidades enormes, através de mecanismos relativamente simples de auto-reprodução, que seguem algumas regras básicas:

- a) *evolução ocorre ao nível dos cromossomos.* Ou seja, o organismo não evolui, apenas serve de veículo no qual os genes são conduzidos e passados adiante. São os cromossomos que sofrem alterações com o reagrupamento dos genes;
- b) *a natureza tende a fazer mais cópias dos cromossomos que produzem um organismo mais adaptado.* Se um organismo sobrevive tempo suficiente e é saudável, seus genes têm uma capacidade maior de ser passados às próximas gerações através da reprodução;
- c) *a diversidade deve ser mantida na população.* Aparentemente, mutações aleatórias acontecem com frequência na natureza, com o objetivo de garantir a ocorrência de variações nos organismos. Estas mutações genéticas geralmente resultam numa útil, e até mesmo vital, característica de sobrevivência das espécies. Com uma gama maior de possíveis combinações, uma população está menos sujeita a fraquezas comuns, como vírus, por exemplo, ou outros problemas associados à procriação consanguínea, que poderiam vir a afetar e destruir todos os seus indivíduos.

Holland (1975) aplicou essas propriedades da evolução a seqüências simples de números, codificando seu problema numa seqüência binária, representando os cromossomos. Fazendo com que computadores gerassem muitas seqüências aleatórias, de forma a produzir uma população, determinou seu algoritmo genético, o qual, apesar de simples e robusto, encontrou soluções ótimas para uma grande variedade de problemas.

Optou-se pelo Algoritmo Genético devido à sua adequação a problemas não-lineares, onde cada parâmetro é tratado como uma variável dependente, incapaz de ser resolvida isoladamente das demais.

ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi realizado com a aplicação do modelo proposto na bacia do Rio Palmital,

buscando-se otimizar a seqüência de aplicações de medidas de despoluição, de forma a aproximar esse rio da situação em que foi enquadrado. Tal bacia, que faz parte da bacia do Altíssimo Iguazu, possui área superior a 560 km² e abriga as captações de água dos Rios Iguazu e Irai (Andreoli, 1999). O Rio Palmital, com suas nascentes localizadas no município de Colombo, atravessa regiões predominantemente rurais até atingir o município de Pinhais, onde suas margens apresentam alto índice de ocupação urbana. A classificação quanto à qualidade de suas águas obedece à portaria nº 20, de 12 de maio de 1992, da Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (Surehma, 1992), que determina seu enquadramento, disposta a seguir:

Art. 1º - Todos os cursos d'água da Bacia do Rio Iguazu de domínio do Estado do Paraná, pertencem à Classe "2".

Art. 2º - Constitui exceção ao enquadramento constante:

VI - Rio Belém contribuinte da margem direita do rio Iguazu, e seus afluentes, a jusante do Bosque João Paulo II, Município de Curitiba, que pertence à Classe "3".

VII - Rio Barigüi, contribuinte da margem direita do rio Iguazu, a jusante do Parque Barigüi, Município de Curitiba, que pertence à Classe "3".

De acordo com Krüger (1997), os dados da estação fluviométrica Vargem Grande (código do Departamento Nacional de Águas e Energia - DNA-EE 65006055), operada pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA) podem ser usados para caracterizar hidrológicamente a bacia do Rio Palmital. Essa estação, instalada em março de 1984, encontra-se em operação e se localiza um quilômetro a montante da foz do Rio Palmital.

MATRIZ DAS FONTES DE POLUIÇÃO

Após a definição de um diagrama topológico com base no Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguazu (PDHBAI) e no Projeto Experimental para Análise de Outorgas, executados pela SUDERHSA (2000), foi realizada a construção da matriz de fontes de poluição com base no Projeto Iguazu, Meta Física MF 1.1.2 – Levantamento e Mapeamento dos Pontos de Captação, Lançamento de Efluentes e Fontes Difusas, incluindo a Definição de Vazões e Cargas Poluidoras (Matriz de Fontes de Poluição) Fernandes (2005).

Os dados característicos da bacia compreendem, entre outros valores relevantes, a extensão do rio, sua declividade longitudinal, o coeficiente de *Manning* e a área e a população da bacia hidrográfica. Os valores de vazões foram obtidos com base no PDHBAl, que, por sua vez, é baseado no Projeto HG-77 – *Regionalização de Vazões em Pequenas Bacias Hidrográficas do Estado do Paraná* (Kaviski e Krüger, 1995), e englobam vazões mínimas, moderadas e críticas. As considerações em relação às cargas de poluentes foram realizadas com a discriminação destas em domésticas, industriais e difusas, identificando nome, origem, tipo, vazão do efluente, carga de DBO e eficiência para cada tipo de contribuinte. O último grande grupo compõe os dados de entrada no modelo de qualidade da água em termos de vazões e cargas totais e suas respectivas concentrações de DBO. Obtido através de calibração em função da Curva de Descarga do Rio Palmital em Vargem Grande, o coeficiente de *Manning* (η) adotado foi 0,047.

Visando a utilização do QUAL2E, programa de modelagem da qualidade da água da *Environmental Protection Agency* (EPA), a bacia hidrográfica foi dividida em tramos, que correspondem às áreas de contribuição identificadas no PDHBAl. Cada tramo apresenta vazões e cargas que, dependendo de sua característica, podem ser distribuídas pontual ou linearmente na sua extensão.

MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA

As medidas de despoluição hídrica são definidas no PDHBAl, realizado pela SUDERHSA (2000), como “propostas de ações que têm por objetivo a redução da poluição e a proteção da qualidade das águas, podendo ser divididas em dois grupos básicos: as Medidas de Gestão, de caráter não estrutural, que visam propiciar instrumentos necessários à efetiva gestão dos recursos hídricos, e as Medidas Estruturais, de caráter corretivo, voltadas ao saneamento e à recuperação e proteção dos recursos hídricos através da implementação de serviços e obras.”. Devido ao fato da Bacia do Alto Iguaçu ter como fontes de poluição preponderantes a doméstica, a industrial e a difusa, as medidas utilizadas tratam da mitigação da carga de poluentes para essas fontes de poluição.

Os dados utilizados foram extraídos do *ANEXO 1 – Principais Medidas de Despoluição Hídrica em termos de remoção de carga característica e custos unitários*,

que faz parte da meta física MF 2.1.2 – CONSTRUÇÃO DE MODELO QUE RELACIONA MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO COM A REMOÇÃO DE CARGAS E SEUS EFEITOS SOBRE O CORPO HÍDRICO E SEUS CUSTOS (Fernandes, 2005).

ESTUDO DE CASO - USO DOS PROGRAMAS EVOLVER E ADV_DIF

O estudo de caso foi resolvido utilizando os dados retirados dos relatórios de SUDERHSA (2000) e Fernandes (2005), como entrada para o *software* Evolver 4.0.8. Depois de processados, esses dados alimentaram o programa ADV_DIF, que trabalhou acoplado àquele *software*. O Evolver encontrou a melhor solução a partir de uma abordagem *steady-state*, onde cada indivíduo é substituído individualmente ao invés de toda uma geração, operando durante 30 minutos para cada um dos valores (2, 4, 7, 11 e 16 milhões de reais) de investimento adotados. Dentre os métodos disponíveis, optou-se pela receita (*recipe*), indicado para variáveis independentes, a taxas de 0,1 (10%) para a mutação e 0,5 (50%) para o *crossover* dos cromossomos. A população inicial de 250 indivíduos foi gerada aleatoriamente pelo programa e seus resultados de potencial de remoção de DBO foram utilizados pelo ADV_DIF, que determinou a concentração de poluentes em cada elemento computacional, em cada tramo e finalmente para toda a bacia. Como o Evolver não trabalha com o termo geração, os valores dispostos na tabela 3 referem-se ao equivalente encontrado pela razão entre o número de ensaios individuais e o tamanho da população.

Na tabela 3 é possível observar, para cada valor investido, alguns dados como o número total de indivíduos após 30 minutos, o tempo necessário para se obter o melhor resultado e o número equivalente em gerações, obtidos com o Evolver.

RESULTADOS

Os resultados encontrados refletem uma situação em que o aumento do montante a ser investido determina uma taxa de redução bastante expressiva na concentração do corpo hídrico analisado. Com o uso do modelo proposto foi possível indicar os conjuntos de medidas de despoluição capazes de maximizar a remoção de poluentes. Os estudos foram conduzidos observando-se:

Tabela 3 - Valores obtidos no Evolver durante 30 minutos e para o melhor resultado.

Investimento (milhões de reais)	2	4	7	11	16
Total de ensaios	744553	696749	716342	508673	544603
Total de gerações	2978	2786	2865	2034	2178
Ensaio ótimo	664141	686133	545543	431839	462800
Geração ótima	2656	2744	2182	1727	1851
Tempo até o ensaio ótimo (min)	26,83	29,55	23,08	25,53	25,47

- a) a quantidade de uso de cada medida em cada tramo, em função de sua unidade característica;
- b) os benefícios gerados, em termos do potencial de remoção de cargas pontuais e difusas;
- c) os respectivos custos, em reais, acarretados com a aplicação das medidas;
- d) o valor total do capital efetivamente utilizado no processo.

A seguir, encontram-se discriminados os resultados otimizados para os valores investidos de R\$ 2, 4, 7, 11 e 16 milhões (tabela 4).

Tabela 4 - Resultados de concentração.

Investimento (milhões de reais)	0	2	4	7	11	16
Concentração (mg/l)	85,39	78,46	67,06	52,84	32,66	8,54

Na figura 2 são apresentados, em termos da concentração de poluentes, os resultados obtidos para os valores de investimento aplicados. Estes valores foram calculados para o ponto escolhido como o mais significativo da bacia, localizado no último elemento computacional do sétimo tramo, ou seja, no ponto mais a jusante do Rio Palmital.

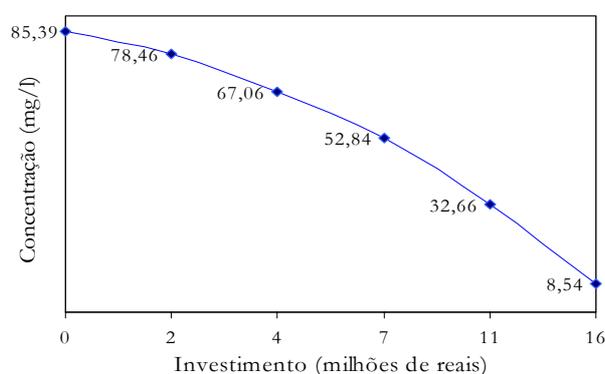


Figura 2 - Concentrações e investimentos.

Observa-se claramente a significativa diminuição na concentração de poluentes, decorrente do aumento do capital investido.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um ferramental de auxílio à decisão quanto aos investimentos necessários em medidas de despoluição hídrica, mediante o uso de análise matemática com base nos Algoritmos Genéticos. Para isso, fez-se necessário identificar e analisar os parâmetros de qualidade da água, determinar os custos envolvidos na aplicação das medidas de despoluição, identificar e analisar os métodos de programação matemática aplicáveis ao estudo em questão, identificar as fontes de poluição do objeto de estudo e identificar, analisar e executar um modelo de simulação, de modo a obter resultados para análise. Pelo que foi apresen-

tado neste texto, conclui-se que os propósitos e objetivos foram totalmente atingidos.

O método proposto pode auxiliar os responsáveis pelos processos de despoluição, apontando um caminho na aplicação de medidas de despoluição hídrica e mostrando quais são mais eficientes quanto à remoção da carga de poluentes. Porém, devido a fatores externos, não considerados por questões de simplificação, deve-se avaliar a viabilidade técnica de utilização das MDH nos pontos de aplicação.

Fez-se necessário o desenvolvimento do programa ADV_DIF para determinação das concentrações ao longo do Rio Palmital, pois o uso de programas mais complexos demandaria um tempo muito maior para possibilitar o seu acoplamento ao *software* Evolver 4.0.8, utilizado na otimização através de um algoritmo genético. O programa ADV_DIF trabalhou acoplado ao Evolver, utilizando os valores otimizados como dados de entrada e retornando os valores da concentração ao longo do rio.

Com os resultados, obtidos no estudo de caso, foi possível demonstrar toda a potencialidade do método, sendo suficiente para cumprir o objetivo de indicar a melhor seqüência de medidas a serem aplicadas para a resolução do problema proposto.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se destacar o levantamento dos valores de custo da aplicação de medidas de despoluição hídrica levando em conta o local de sua aplicação, de maneira a fornecer valores mais apurados para os custos. Além disso, sugere-se que sejam levantados os dados do benefício gerado para todas as MDH utilizadas, conferindo, assim, resultados mais próximos à realidade. Na avaliação dos resultados, em termos da redução na concentração de poluentes, sugere-se a utilização do modelo de qualidade da água QUAL2K da *Environmental Protection Agency* – EPA, dos Estados Unidos. O QUAL2K é uma nova versão do largamente utilizado QUAL2E, que apresenta como implemento a facilidade de ser compatível com todas as versões do sistema operacional Windows da Microsoft. A utilização de modelos mais complexos pode trazer resultados interessantes, porém requer uma investigação quanto ao uso integrado ao *software* de otimização utilizado.

REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, Cleverson V.; DALARMI, Osvaldo; LARA, Aderlene I.; RODRIGUES, Eloize M.; ANDREOLI, Fabiana de Nadai. *Os Mananciais de Abastecimento do Sistema Integrado da Região Metropolitana de Curitiba – RMC*. SANARE – Revista Técnica da Sanepar, vol.12, n°12, 1999. Disponível em: <<http://www.sanepar.com.br/sanepar/sanare/V12/Mananciais/mananciais.html>> Acesso em: 07 maio 2004.
- BRANCO, S. Murgel et al., PORTO, Rubem La Laina (org.). *Hidrologia Ambiental*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, vol.3, 1991.
- BRASIL, PARANÁ. Portaria SUREHMA n° 20, de 12 de maio de 1992. *Enquadrar os cursos d'água da Bacia do Alto Iguaçu de domínio do Estado do Paraná*. Coleção de Legislação Ambiental, 1995.
- CASAROTTO Filho, Nelson; KOPITKE, Bruno Hartmut. *Análise de Investimentos*. São Paulo: Vértice, Editora Revista dos Tribunais Ltda., 1987.
- FERNANDES, Cristovão V. S. (Coordenador). *Análise da Sustentabilidade Econômica e Ambiental de Metas de Despoluição Hídrica – Estudo de Caso: Alto Iguaçu*. Projeto Iguaçu. UFPR – FINEP – SUDERHSA – DHS, 2005. Projeto concluído.
- HOLLAND, John H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- KAVISKI, Eloy; KREMER, Gilberto M. *Transport of Mass and Energy of Polyatomic Gases in Magnetic Fields Computed by a Monte Carlo Algorithm*. Continuum Mechanics and Thermodynamics. Springer-Verlag Heidelberg, vol.16, n°4, 2004.
- KAVISKI, Eloy; KRÜGER, Cláudio M. Projeto HG-77, *Regionalização de Vazões em Pequenas Bacias Hidrográficas do Estado do Paraná: Relatório Final*. CEHPAR – Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.
- KRÜGER, Cláudio M. Projeto HG-78, *Estudos de Simulação do Escoamento do Rio Palmital na Região Metropolitana de Curitiba: Relatório Final*. CEHPAR – Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. *Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu*. Curitiba, 2000.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; SCHROEDER, E. D. *Water Quality*. Reading, Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1987.

*Decision-Making Model to Help in River Basin
Cleaning Processes*

ABSTRACT

The article presents tools to help decision-making to apply water cleaning measures by using mathematical analysis based on genetic algorithms. It was attempted to optimize the sequence of investments needed to bring rivers closer to their classification conditions. To solve the problem of optimization, program EVOLVER 4.0.8 of Palisade Corporation was used, an addendum to Microsoft Excel to solve genetic algorithms. Program ADV_DIV, developed for this study, was coupled to this software in order to determine pollutant concentration along the river. The method proposed was applied in the Palmital River basin, which is part of the Altíssimo Iguaçu basin. The results obtained show its potential, and they are sufficient to fulfill the objective established.

Keywords: Optimization, genetic algorithm, cleaning river basins.