

# Otimização de sistemas regionais de sistemas de tratamento de efluentes e seu impacto na qualidade da água: uma revisão

Enéas Souza Machado  
Maria da Conceição Cunha  
Mônica Porto

**RESUMO:** Modelos de programação matemática vêm sendo utilizados desde o início da década de 1960 para a otimização de sistemas de tratamento de efluentes, sejam sistemas localizados ou regionais. As técnicas de otimização envolvem desde as mais tradicionais, como a Programação Linear ou Não Linear, até as mais recentes metaheurísticas. Os mais variados modelos existentes incluem ou não a condição estocástica das variáveis, bem como a inclusão ou não de restrições de qualidade da água. Este artigo apresenta uma revisão dos modelos existentes, sistematizado-os em algumas categorias.

**PALAVRAS CHAVE:** otimização de sistemas de tratamento de efluentes, metaheurísticas, qualidade da água, modelos matemáticos.

**ABSTRACT:** Since the early 1960's, mathematical programming models have been used for the optimization of localized or regional wastewater treatment systems. Traditional optimization techniques have been used, such as Linear or Non Linear Programming, as well as the more recent so called metaheuristics. Such models can include the stochastic condition of the variables, or take into account water quality restrictions. This article revises the existing models, dividing them in some broad categories.

**KEYWORDS:** Optimization of sewage treatment plants, metaheuristics, water quality, mathematical models.

## INTRODUÇÃO

Uma das principais questões ambientais em países menos desenvolvidos é a falta de uma adequada estrutura de coleta e tratamento de efluentes domésticos, levando a uma deterioração da qualidade da água nos corpos d'água, notadamente junto aos grandes centros urbanos. Em função de uma necessidade há décadas não atendida, reportagens publicadas na *mídia* brasileira estimam que seriam necessários R\$ 180 bilhões de investimento até o ano 2015 (US\$ 81 bilhões, ao câmbio de julho de 2006).

Desde o final do Plano Nacional de Saneamento - PLANASA, nos anos 70 do século passado, o Brasil ainda não construiu um novo arranjo institucional e financeiro para lidar com um problema destas dimensões. Alguns projetos de lei têm tramitado no Congresso Nacional, nenhum deles com o necessário apoio de todos os setores envolvidos. Mais cedo ou mais tarde, o tema terá que ser enfrentado. Qualquer que seja o arranjo institucional que se obtenha, os engenheiros e projetistas voltarão a enfrentar a questão: obter o melhor arranjo físico regional, sujeito

a restrições de qualidade da água e, certamente, a restrições orçamentárias.

Como será visto a seguir, existe um grande número de estudos publicados versando sobre o tema da otimização da regionalização do tratamento de efluentes e da qualidade da água dos corpos receptores. O objetivo é quase sempre o mesmo: minimizar custos e maximizar a melhoria da qualidade da água. Os meios, ou sejam, as ações de engenharia variam: estações de tratamento locais e/ou regionais, outras formas de melhoria da qualidade da água, como construção de reservatórios para aumento da vazão mínima dos rios, tratamento da água no próprio leito do rio etc. Tem-se uma grande diversidade nas variáveis consideradas, especialmente nas variáveis utilizadas nos modelos de qualidade da água acoplados, e também como essas variáveis são consideradas: se determinísticas ou estocásticas (vazão dos rios, por exemplo). Também deve ser levada em conta a divisão dos custos associados a essas intervenções e como se considera a questão da equidade. Finalmente, tem-se a miríade de técnicas utilizadas para a otimização do sistema.

## HISTÓRICO DOS MODELOS EXISTENTES

Inicialmente, tecemos alguns comentários sobre a genealogia dos estudos de otimização aplicados ao gerenciamento da qualidade da água. Até onde permitiu o levantamento efetuado, os primeiros estudos sobre o tema remontam ao final da década de 1950 e início dos anos 60. O Programa de Águas de Harvard (*Harvard Water Program*), embora tenha se notabilizado por estudos econômicos, de gestão da quantidade de água e, em especial, pelo desenvolvimento da hidrologia estocástica, também desenvolveu estudos na área da gestão da qualidade da água, consubstanciados no estudo não publicado “Operations Research in Water Quality Management”, de 1963. Já após o término do Programa de Harvard, Dorfman et al. (1972) editaram uma publicação sobre gestão regional da qualidade da água.

Talvez o núcleo inicial mais consistente de pesquisadores no tema tenha se formado junto à Universidade Cornell, no Estado de Nova York. A partir dos trabalhos de A. Charnes, da Universidade Northwestern, aplicando a pesquisa operacional à produção industrial, Walter R. Lynn desenvolveu uma série de trabalhos pioneiros, aplicando métodos da pesquisa operacional para otimização de estações de tratamento de efluentes. O grupo orientado pelo professor Lynn, em Cornell, resultou em uma série de discípulos eméritos: Daniel Loucks e Jon Liebman apresentaram seus trabalhos de doutoramento no tema em 1965. Charles ReVelle terminou seus estudos em 1967, prosseguindo sua notória carreira na Universidade Johns Hopkins, onde notabilizou-se por empregar modelos de otimização na solução de vários problemas no campo da engenharia civil, obtendo renome mundial na Pesquisa Operacional. O professor Liebman também desenvolveu sua carreira em Johns Hopkins, indo depois para a Universidade de Illinois. O professor Loucks permaneceu em Cornell, desenvolvendo vários trabalhos de otimização local ou regional no tratamento de efluentes, levando em conta ou não o caráter estocástico das variáveis dos modelos e a qualidade da água do corpo receptor. Em Johns Hopkins também se destacou o professor J. Hugh Ellis e, na Universidade de Illinois, os pesquisadores J. Wayland Eheart e E. Downey Brill, Jr. Livros importantes têm saído da lavra desses pesquisadores, tais como Loucks et al. (1981), Haith (1982), ReVelle et al. (2004), e ReVelle e McGarity (1997).

Paralelamente, em 1965, o pesquisador alemão Rolf Deininger doutorou-se na Universidade Nor-

thwestern, posteriormente desenvolvendo carreira na Universidade de Michigan. Sua tese de doutorado vem a ser um dos trabalhos pioneiros na utilização de métodos de otimização no campo da qualidade da água. É de sua edição o livro *Models for Environmental Pollution Control* (1974).

Também no início da década de 1960, o Colégio Manhattan, em Nova York, notabilizou-se por pesquisas de qualidade da água, dirigidas por Donald J. O'Connor e Dominic M. DiToro. Um de seus famosos discípulos, Robert V. Thomann, desenvolveu estudos ligando a análise de sistemas à gestão da qualidade da água: vide seus livros Thomann (1972) e Thomann e Mueller (1987).

O grande pioneiro da economia de recursos hídricos aplicada à gestão regional da qualidade da água, é sem dúvida, Allen Kneese, por muitos anos vinculado ao centro de pesquisas *Resources for the Future*, sediado em Washington. O tema da economia de recursos hídricos aplicado à gestão da qualidade da água não será abordado na presente revisão.

No Canadá, destaca-se Edward McBean, da Universidade de Waterloo, onde orientou Donald H. Burn, depois professor da Universidade de Manitoba. Barbara Lance, depois de desenvolver seu doutorado na Universidade de Illinois, vem agora desenvolvendo pesquisas no tema junto à Universidade de Manitoba, também no Canadá. A professora Lance vem desenvolvendo modelos que consideram o risco de violação da qualidade da água e a incerteza nos parâmetros e variáveis dos modelos, também levando em consideração a sazonalidade das vazões.

Na Europa, podemos destacar os trabalhos pioneiros do pesquisador Daniel Tyteca, da Universidade Católica de Louvain, na Bélgica. Tyteca desenvolveu estudos de otimização tanto entre um conjunto de estações de tratamento, como entre as diversas fases de tratamento dentro de uma estação. Os pesquisadores italianos Sergio Rinaldi e Rodolfo Soncini-Sessa, em conjunto com Harald Stehfest e Hiroyuki Tamura publicaram o clássico Rinaldi et al., 1979, ligando a modelagem da qualidade da água à otimização de sistemas.

Mais recentemente, podemos identificar outros pesquisadores que têm se destacado na área de gestão regional da qualidade da água: Okitsugu Fujiwara, do Instituto Tecnológico da Ásia, na Tailândia; P.P. Mujumdar, do Instituto de Ciências da Índia, em Bangalore e Maria da Conceição Cunha, da Universidade de Coimbra, Portugal. Fujiwara estuda

o ambiente estocástico dos modelos de otimização da qualidade da água, aplicando, entre outros, o método das restrições probabilísticas. O professor Mujumdar vem desenvolvendo estudos aplicando técnicas metaheurísticas e riscos medidos através de conjuntos *fuzzy*. A professora Conceição Cunha vem aplicando modelos metaheurísticos para a otimização de sistemas regionais de tratamento de efluentes, em especial o recozimento simulado.

### CLASSIFICAÇÃO DA LITERATURA

Com o intuito de não apenas “olhar as árvores”, mas tentar uma visão de conjunto da “floresta” optou-se por apresentar esta revisão caracterizando os estudos existentes em dois grandes grupos. Evidentemente, toda divisão desse tipo acaba tendo um menor ou maior grau de subjetividade. Tem-se também uma interpenetração desses grupos e certamente, ter-se-á exceções que não se amoldam a essa divisão arbitrária. Mesmo assim essa tentativa é válida, para tentar se entender o desenvolvimento histórico desses modelos de otimização da regionalização da qualidade da água.

A caracterização que se está propondo é a seguinte:

- Estações de tratamento de efluentes individuais: alocação ótima de cargas, minimização de custos, considerações de equidade, sazonalidade. Aqui se incluem os primeiros trabalhos desenvolvidos no início da década de 1960, quando ainda não eram estudadas ETEs regionais;
- Estações de tratamento de efluentes regionais: locação e macro dimensionamento, considerando ou não a dinâmica temporal de implantação das instalações. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os estudos consultados sobre otimização de ETEs individuais e regionais, em ordem cronológica, com as seguintes colunas:
  - Ano da publicação
  - Autor(es) do trabalho
  - Técnica de otimização utilizada
  - Consideração, ou não, da qualidade da água;
  - Consideração ou não, da aleatoriedade das variáveis;
  - Consideração ou não do faseamento de implantação das ETEs.

Apenas três de todos os trabalhos citados são brevemente descritos: Deininger (1965), pelo pioneirismo, Ong (1983), onde se considera a dinâmica temporal do aumento de cargas e de implantação de ETEs e Cunha et al. (2004), por estar desenvolvendo a aplicação de metaheurísticas em modelos regionais de melhoria da qualidade da água.

### MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA ESTAÇÕES DE TRATAMENTO LOCAIS

Os primeiros trabalhos sobre gestão da qualidade da água que apareceram nos anos 1960, versavam basicamente sobre o tema: dada uma série de fontes pontuais, qual o grau de eficiência mínimo em cada ETE individual, de tal maneira que se minimizem os custos de implantação e/ou de operação de tais estações, respeitando certos padrões de qualidade da água no corpo receptor, ou, olhando indiretamente para a qualidade da água, limitando as emissões máximas.

Deininger (1965) desenvolveu um dos primeiros modelos de otimização para ETEs individuais, baseado em Programação Linear. Dadas  $n$  fontes de lançamento, o objetivo é determinar a eficiência que cada ETE local deve ter, de modo a atender a carga limite de DBO a ser lançada em cada seção, a um custo de implantação total mínimo. A Função Objetivo visa minimizar o custo de implantação das ETEs, supondo que o custo varie linearmente com o grau de tratamento:

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1)$$

Onde:

Z: valor da Função Objetivo

$c_i$ : custo de remoção na ETE  $i$

$x_i$ : % de remoção na ETE  $i$

Sujeito a:

(i) O primeiro conjunto de restrições limita as cargas remanescentes à carga limite de DBO em cada seção;

(ii) O segundo conjunto de restrições diz respeito ao limite superior do nível de remoção nas estações.

O autor apresenta três abordagens: mesmo grau de tratamento para todos os lançamentos, graus variáveis de tratamento, restringindo-se a carga lançada, e definição de ETEs regionais, minimizando o custo total do sistema. Também é apresentada uma

TABELA 1  
Estudos de gestão da qualidade da água para Estações Individuais de Tratamento de Efluentes

Ano	Autor(es)	Método de Otimização	Modelo de Qualidade da Água	Consideração de Aleatoriedade	Faseamento
1965	Deiminger	Programação Linear e Programação Inteira	Cinética de 1 ordem	não considerada	não considerado
1965	Sobel	Programação Linear + Programação Quadrática	Modelo de Thomann	Minimização da variância do aumento do OD	não considerado
1966	Goodman e Dobbins	Steepest ascent	considerada (modelo não especificado)	não considerada	não considerado
1966	Loucks e Lynn	não utilizado	Streeter-Phelps, modificado por Dobbins	curvas probabilísticas de OD a partir de cadeias de Markov	não considerado
1966	Liebman e Lynn	Programação Dinâmica	Streeter-Phelps	não considerada	não considerado
1966	Kerri	Programação Linear	Streeter-Phelps	não considerada	não considerado
1967	ReVelle et al.	Programação Linear	Streeter-Phelps	não considerada	não considerado
1967	Johnson	Programação Linear	Steady state linear do modelo de Thomann para estuários	não considerada	não considerado
1968	ReVelle et al.	Programação Linear	Dobbins e Camp	não considerada	não considerado
1968	Liebman e Marks	Programação Inteira	Modelo de Thomann para estuários	não considerada	não considerado
1968	Anderson e Day	Programação Linear	Streeter-Phelps, modificado por Thomas	não considerada	não considerado
1969	Smith e Morris	Programação Linear	Modelo de Thomann para estuários	não considerada	não considerado
1975	Hyden et al.	Programação Não Linear	Streeter-Phelps	não considerada	não considerado
1975	Arbabi e Elzinga	Programação Linear	Streeter-Phelps	não considerada	não considerado
1975	Ecker	Programação Geométrica	Streeter-Phelps	não considerada	não considerado
1976	Bishop e Grenney	Programação Inteira	Modelo da Univ. Estadual de Utah	não considerada	não considerado
1976	Armstrong	Programação Dinâmica	não considerada	não considerada	não considerado
1976	Brill et al.	Programação Linear	não considerada	não considerada	não considerado
1978	Lohani e Thanh	Restrições probabilísticas	Streeter-Phelps, modificado por Camp	não considerada	não considerado
1978	de Lucia et al.	Programação Linear	Streeter-Phelps, modificado por Sigvaldason	não considerada	considera dois períodos de adaptação à lei
1979	Lohani e Thanh	Restrições probabilísticas	Streeter-Phelps, modificado por Camp	estocástico nas vazões	não considerado

Ano	Autor(es)	Método de Otimização	Modelo de Qualidade da Água	Consideração de Aleatoriedade	Faseamento
1982	Smeers e Tyteca	Programação Não Linear	Streeter-Phelps	não considerada	não considerado
1985	Burn e McBean	Restrições probabilísticas	Streeter-Phelps	Monte Carlo (incerteza de 1 ordem nas vazões, cargas e coef. de QA)	não considerado
1986	Fujiwara et al.	Restrições probabilísticas	Streeter-Phelps, modificado por Camp e Dobbins	A vazão do rio é uma variável aleatória, com DP conhecida.	não considerado
1987	Fujiwara et al.	Restrições probabilísticas	Streeter-Phelps, modificado por Camp e Dobbins	probabilidade na vazão	não considerado
1988	Fujiwara et al.	Restrições probabilísticas	Streeter-Phelps, modificado por Camp e Dobbins	simulação Monte Carlo para os quantis de concentração de OD+ restrições probabilísticas	não considerado
1987	Ellis	Restrições probabilísticas	Streeter-Phelps, modificado por Camp e Dobbins	probabilidade na vazão, nível inicial de DBO, déficits de OD nos efluentes e nos parâmetros do modelo de QA	não considerado
1987	Burn e McBean	Programação Quadrática + Programação Fractal	Streeter-Phelps	cargas com variabilidade; matriz de coeficientes de transferência também variável	não considerado
1989	Rossmann	Programação Não Linear	Implícita	risco de violação sazonal é markoviano	alocação sazonal de cargas
1990	Lence et al.	Programação Não Linear	Thomann e Mueller	análise sazonal de riscos	vazões sazonais
1990	Tung e Hathhorn	Programação Linear com Restrições Probabilísticas	Streeter-Phelps	matriz de covariância para parâmetros de QA gerada por simulação	não considerado
1992	Burn e Lence	Programação Linear	Thomann e Mueller	incerteza aparece na vazão, temperatura e carga difusa	não considerado
1993	Cardwell e Ellis	Programação Dinâmica	Streeter-Phelps, QUAL2E e WASP4	incerteza nos parâmetros dos modelos de QA	não considerado
1995	Takyi e Lence	Prog. Linear + Prog. Não Linear	Thomann e Mueller	risco de violação da QA simulado por cadeias de Markov	não considerado
1996	Takyi e Lence	Modelo de Chebyshev	Streeter-Phelps, modificado por Camp - Dobbins	não considerada	não considerado
1997	Chang et al.	Programação Inteira Mista fuzzy multiojetivos	não especificado	Parâmetros por sistemas gray; função fuzzy para a FOB	não considerado

TABELA 1  
Estudos de gestão da qualidade da água para Estações Individuais de Tratamento de Efluentes (continuação)

Ano	Autor(es)	Método de Otimização	Modelo de Qualidade da Água	Consideração de Aleatoriedade	Faseamento
1998	Sasikumar e Mujumdar	Otimização fuzzy multiobjetivo	Streeter-Phelps, modificado por Fujiwara	Conjuntos fuzzy	não considerado
1999	Takyi e Lence	Múltiplas Realizações, Redes Neurais e heurística	Streeter-Phelps, modificado por Campbell – Dobbins	simulação Monte Carlo para criação de cenários	não considerado
2000	Carmichael e Strzepek	Programação Não Linear	QUAL2E	não considerada	não considerado
2001	Burn e Yulanti	Algoritmos Genéticos, multi objetivo	QUAL2E	não considerada	não considerado
2002	Efstratiadis e Koutsoyiannis	Algoritmo simplex de Nelder-Mead + Reconhecimento Simulado	É modelo geral para otimização de sistemas de recursos hídricos	não considerada	não considerado
2002	Ali	Programação Inteira Mista Estocástica	função empírica para controle de pH	distribuição estatística das cargas	não considerado
2002	Mujumdar e Sasi-kumar	Conjuntos Fuzzy	Streeter-Phelps, modificado por Fujiwara	risco sazonal	não considerado
2003	Uhami e Kawachi	Teoria de controle H <sub>1</sub>	não considerada	considerada	não considerado
2004	Vemula et al.	Algoritmos Genéticos + Risco Fuzzy	QUAL2E	simulação Monte Carlos para distribuição dos níveis de QA	não considerado
2004	Mujumdar e Vemula	Algoritmos Genéticos + Risco Fuzzy	QUAL2E	metas fuzzy	não considerado

TABELA 2  
Estudos sobre locação e dimensionamento de Estações Regionais de Tratamento de Efluentes

Ano	Autor(es)	Método de Otimização	Modelo de Qualidade da Água	Consideração de Aleatoriedade	Faseamento
1969	Graves et al.	Programação Linear	os padrões de QA são fixados	não considerada	não considerado
1972	Haimes et al.	Múltiplos níveis; decomposição	os padrões de QA são fixados	não considerada	não considerado
1972	Wanielista e Bauer	Programação Inteira + heurística	não considerada	não considerada	não considerado
1972	Converse	Programação Dinâmica	não considerada	não considerada	não considerado
1972	Graves et al.	Programação Não Linear	função de transferência em estuários (Thomann)	não considerada	não considerado
1973	McConagha e Converse	Heurística	não considerada	não considerada	não considerado
1973	Deininger e Su	Programação Convexa	não considerada	não considerada	considerado
1974	Joeres et al.	Programação Inteira	não considerada	não considerada	não considerado
1976	McNamara	Programação Geométrica	Streeter-Phelps	não considerada	não considerado
1976	Whitlatch e ReVelle	Heurística + Programação Dinâmica + Programação Linear	função de transferência em estuários (Thomann)	não considerada	não considerado
1976	Weeter e Belardi	Heurística	não considerada	não considerada	não considerado
1977	Chiang e Lauria	Heurística	não considerada	não considerada	considerado
1978	Brill, Jr. e Nakamura	Programação Inteira Mista	não considerada	não considerada	não considerado
1978	Rossmann	Programação Dinâmica	não considerada	não considerada	considerado
1979	Nakamura e Brill, Jr.	Programação Não Linear	não considerada	não considerada	não considerado
1981	Mandl	revisão do estado da arte	--	--	--
1981	Nakamura et al.	Vários modelos	não considerada	não considerada	considerado
1982	Chang et al.	Programação Inteira Mista	não considerada	não considerada	não considerado
1982	Phillips et al.	Programação Inteira Mista	não considerada	não considerada	não considerado
1983	Ong	Programação Não Linear E Dinâmica	Streeter-Phelps	Incerteza na demanda	considerado
1984	Leighton e Shoemaker	Programação Inteira	não considerada	não considerada	não considerado

TABELA 2  
Estudos sobre locação e dimensionamento de Estações Regionais de Tratamento de Efluentes (continuação)

Ano	Autor(es)	Método de Otimização	Modelo de Qualidade da Água	Consideração de Aleatoriedade	Faseamento
1985	Klemetson e Grenney	Programação Dinâmica	não considerada	não considerada	Considerado
1988	Zhu e ReVelle	Programação Inteira	não considerada	não considerada	não considerado
1992	Melo	Heurística + Programação Dinâmica Discreta	limites de emissão de cargas	não considerada	considerado
1993	Voutchkov e Boulos	Heurística	não considerada	não considerada	não considerado
1994	Melo e Câmara	revisão do estado da arte	--	--	--
1999	Souza e Cunha	Recozimento simulado	não considerada	não considerada	não considerado
2000	ReVelle	revisão do estado da arte	--	--	--
2002	Souza et al.	Recozimento simulado	não considerada	não considerada	não considerado
2004	Cunha et al.	Recozimento simulado	QUAL2E	não considerada	não considerado
2005	Cunha et al.	Recozimento simulado	QUAL2E	não considerada	não considerado

solução por Programação Inteira, com três níveis de tratamento para as ETEs.

### Modelos de otimização para sistemas regionais

Passamos agora a analisar os trabalhos que tratam direta ou indiretamente da questão da otimização do número de ETEs, seus respectivos volumes tratados e grau de eficiência de remoção, para atender uma dada região a um custo mínimo. A qualidade da água dos corpos receptores, quando considerada, aparece como um conjunto de restrições adicionais. Os modelos podem ser estáticos ou dinâmicos, no que diz respeito à variação temporal na implantação das estações.

Ong (1983) desenvolveu modelos regionais para ETEs, estáticos e dinâmicos em relação ao tempo. Os modelos consideram como variáveis independentes, ou somente a capacidade hidráulica das ETEs, ou a capacidade e o nível de tratamento.

O modelo estático utiliza um algoritmo heurístico utilizado pelo autor, denominado RPS (*Random Polyhedron Search*). Na primeira parte o algoritmo estabelece um poliedro de  $NX + 1$  vértices (sendo  $NX$  o número de variáveis independentes), localizado dentro da região viável. Partindo de um vetor tentativo inicial, o procedimento gera um ponto viável, calculando-se o valor da Função Objetivo. O mesmo procedimento é repetido por um certo número de vezes (maior que  $NX + 1$ ), escolhendo-se então os melhores pontos como vértices do poliedro. A segunda fase do modelo é a busca da solução ótima, utilizando-se uma modificação do modelo de "busca poliédrica flexível", proposto por Nelder e Mead, como citado por Ong (1983). O segundo modelo apresentado pelo autor vem a ser um modelo dinâmico no tempo para um único subsistema (ETE + interceptores + Estação Elevatória). O modelo de expansão dinâmica de capacidade é formulado como uma rede acíclica. Cada arco  $(i, j)$  desta rede tem um custo associado  $C_{ij}$ , e é resolvido através de Programação Dinâmica, pela seguinte equação recursiva regressiva, originalmente proposta por Manne, como citado por Ong (1983):

$$f(i) = \text{MIN} [C_{ij} + f(j)/(1+r)^{T_j-T_i}] \quad (2)$$

$$j=i+1, \dots, N$$

onde:

$i$ :  $N-1, N-2, \dots, 1, 0$ , com  $f(N)=0$ ;

$C_{ij}$ : custo da expansão do tratamento e de operação da expansão;

$f(i)$ : custo ótimo de expansão do subsistema, de uma capacidade  $D(T_i)$  (tempo  $i$ ) até a capacidade  $D(T_N)$  (tempo  $N$ );

$r$ : taxa de desconto.

Para o caso de duas variáveis de decisão, capacidade hidráulica e nível de tratamento, também é utilizado o conceito de rede acíclica para se obter a rota de menor custo. Neste caso, como há uma segunda variável, o termo  $C_{ij}$ , na equação 2, é calculado com o apoio de uma segunda equação de recursão regressiva:

$$g(k) = \text{MIN} [d_{km} + g(m)/(1+r)^{(T_m - T_k)}] \quad (3)$$

$$m=k+1, \dots, N$$

onde:

$k = N-1, N-2, \dots, i+1, i$ , com  $g(N)=0$ ;

$g(k)$ : custo ótimo de expansão de ETE, com tamanho  $(D(T_j)-D(T_i))$ , do tempo  $T_k$  ao tempo  $T_N$ , e tal que seu nível de tratamento seja sempre igual ou maior que  $\eta(t)$ .

O terceiro modelo apresentado pelo autor conjuga os modelos estático e dinâmico, com o objetivo de determinar a expansão ótima de um sistema de ETEs regionais ao longo de um horizonte de planejamento. O modelo é decomposto em dois níveis: o nível inferior, se refere à otimização, via o modelo de Programação Dinâmica acima descrito para cada subsistema em separado. O nível superior é utilizado para coordenar esses subproblemas através do algoritmo RPS de otimização não linear.

O modelo regional dinâmico tem as seguintes variáveis:

$X_{it}$ : quantidade de efluentes a ser tratada na ETE  $i$ , ao final do  $t$ -ésimo período de tempo;

$X_{uit}$ : quantidade máxima de efluentes que pode ser tratada na ETE  $i$ , ao final do  $t$ -ésimo período (devido a restrições físicas e/ou de qualidade da água);

$XC_{it}$ : capacidade bruta de tratamento na ETE  $i$ , no início do período  $t$ , depois de nova capacidade adicionada;

$Y_{it}$ ,  $Z_{it}$ : quantidade de efluentes transportados pela  $i$ -ésima seção do interceptor (para jusante ou montante, respectivamente), ao fim do  $t$ -ésimo período de tempo;

$YC_{it}$  e  $ZC_{it}$ : capacidade bruta da  $i$ -ésima seção de interceptor, no início do período  $t$ , depois de nova capacidade adicionada (jusante e montante, respectivamente);

$W_{it}$ : pode ser igual a  $Y_{it}$  ou  $Z_{it}$ , onde  $j$  representa a seção de interceptor ligado à  $i$ -ésima estação elevatória;

$WC_{it}$ : pode ser igual a  $YC_{it}$  ou  $ZC_{it}$ ;

$CP_{it}(Y_{it}, Y_{i,t-1}, YC_{it}, YC_{i,t-1})$ ,  $CP_{it}(Z_{it}, Z_{i,t-1}, ZC_{it}, ZC_{i,t-1})$ : valor presente dos custos de expansão para interceptores no período  $t$  (jusante e montante, respectivamente);

$CT_{it}(X_{it}, X_{i,t-1}, XC_{it}, XC_{i,t-1})$ : valor presente do custo de expansão e operação de ETEs no período de tempo  $t$ ;

$CPP_{it}(W_{it}, W_{i,t-1}, WC_{it}, WC_{i,t-1})$ : valor presente do custo de expansão e operação da  $i$ -ésima estação de bombeamento no período  $t$ ;

$\eta_{it}$ : grau de tratamento requerido na ETE  $i$ , no período de tempo  $t$ ;

$\eta C_{it}$ : grau de tratamento a ser provido à ETE  $i$ , ao final do período de tempo  $t$ , depois da nova capacidade adicionada entrar em operação;

$np$ : número total de estações de bombeamento;

$N$ : número total de períodos de tempo em que é dividido o horizonte de planejamento.

A Função Objetivo é dada por:

$$\begin{aligned} \text{MIN} \quad & \sum_i \sum_{t=1}^N CPit(Yit, Yi, t-1, YCit, YCi, t-1) \\ & + \sum_i \sum_{t=1}^N CPit(Zit, Zi, t-1, ZCit, ZCi, t-1) + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^N CTit(Xit, Xi, t-1, XCit, XCi, t-1), \\ & \eta it, \eta i, t-1, \eta Cit, \eta Ci, t-1 \\ & + \sum_{i=1}^{np} \sum_{t=1}^N CPPit(Wit, Wi, t-1, WCit, WCi, t-1) \end{aligned} \quad (4)$$

com as seguintes restrições:

(1) balanço de vazões entre efluentes gerados em cada fonte ( $X_{it}$ ), quantidade tratada em cada ETE ( $S_{it}$ ) e vazões nos interceptores ( $Y_{it}$  e  $Z_{it}$ );

(2) limites máximos para as vazões a serem tratadas nas ETEs;

(3) restrições na capacidade de tratamento das ETEs, interceptores e estações de bombeamento, quando os custos de não atendimento são infinitos, incluindo as relações monotônicas que devem existir na mesma variável ao longo do tempo;

(4) restrições de nível de tratamento: mínimo, máximo e relações monotônicas;

(5) restrições de qualidade da água.

Poucos trabalhos têm sido desenvolvidos com o auxílio das modernas metaheurísticas. Cunha et al. (2004) desenvolveram um modelo de Programação Inteira, através de otimização por Recozimento Simulado, com restrições de qualidade da água calculadas pelo modelo QUAL2E (Brown e Barnwell, 1987).

Dadas as variáveis:

$x_{ij}$ : variável binária:  $x_{ij} = 1$ , se existir rede ligando nó  $i$  ao nó  $j$ ;

$x_{ij} = 0$ , caso contrário

$y_k$ : variável binária:  $y_k = 1$ , se existir ETE no nó  $k$ ;

$y_k = 0$ , caso contrário

A Função Objetivo do modelo proposto é:

$$\begin{aligned} \text{MIN} \quad & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M C_{ij}(Q_{ij}, L_{ij}, E_i, E_j, x_{ij}) + \\ & \sum_{k=m+1}^M C_k(QT_k, y_k) \end{aligned} \quad (5)$$

Sujeito às seguintes restrições:

a) equação da continuidade para os nós com fontes de efluentes, possíveis nós intermediários e nas ETEs:

b) restrição de que todo o esgoto produzido na região seja tratado:

c) restrição de vazão mínima e máxima para os coletores, função do diâmetro, declividade e velocidade, calculados pela equação de Manning:

d) restrição de vazão máxima nas ETEs:

e) restrição  $\{0,1\}$  para coletores e ETEs:

f) restrição de não-negatividade de vazões nas ETEs e nos coletores.

g) restrições de qualidade da água para o oxigênio dissolvido, nitrogênio total, fósforo total e nitrogênio Kjeldahl:

Onde:

M: num. total de nós:  $1, \dots, i, j, \dots, M$  (inclui nós de fontes de efluentes, nós intermediários e nós com ETEs);

$1, \dots, n$ : fontes de efluentes;

$n+1, \dots, m$ : locais de possíveis nós intermediários;

$m+1, \dots$ : nós para possíveis ETEs;

$L_{ij}$ : extensão de coletor entre os nós  $i$  e  $j$ ;

$Q_{ij}$ : vazão no coletor entre os nós  $i$  e  $j$ ;

$E_p, E_j$ : carga hidráulica entre os nós  $i$  e  $j$ , respectivamente;

$C_k$ : valor presente do custo de instalação, operação e manutenção de ETE no nó  $k$ ;

$C_{ij}$ : valor presente do custo de instalação, operação e manutenção de coletor ligando nó  $i$  ao nó  $j$ ;

$QT_k$ : vazão a ser tratada na ETE  $k$ ;

$QR_i$ : efluente produzido no nó  $i$ ;

A Função Objetivo expressa a minimização dos custos totais descontados de instalação, operação e manutenção para os coletores e as ETEs. A otimização do sistema é feita através de Recozimento Simulado. Esta metaheurística inspira-se no processo de recozimento: um aumento de temperatura proporciona mobilidade às moléculas e, após um resfriamento lento, estas moléculas formam uma estrutura cristalina. Um resfriamento adequado faz com que se chegue a um estado de energia mínima, que seria o estado ótimo no caso de aplicação a otimização de sistemas. O mecanismo de perturbação utilizado para gerar a configuração candidata é de aleatoriamente substituir um dado coletor por

outro não constante nesta configuração, e também escolhido aleatoriamente, desde que ligado à mesma fonte de efluentes ou nó intermediário. Cada solução candidata é testada no que diz respeito às restrições impostas. O modelo de qualidade (QUAL2E) verifica as restrições de qualidade da água. Após a verificação das restrições, aplica-se o critério de Metropolis (Metropolis et al., 1953). O critério calcula a probabilidade de substituir a configuração atual ( $S$ ) por uma configuração ( $S'$ ):

$$p = \min \left\{ 1, \exp \left( \frac{\Delta C}{\theta} \right) \right\} \quad (6)$$

onde  $\Delta C = C(S) - C(S')$  e  $\theta$  um parâmetro positivo.

O algoritmo de Recozimento Simulado considera quatro parâmetros: (i) a elasticidade de aceitação, ou seja, a probabilidade de se aceitar uma transição da configuração inicial para uma configuração candidata cujo custo é superior ao da configuração inicial numa dada probabilidade, e que define a temperatura inicial do processo; (ii) o número mínimo de iterações em uma mesma temperatura, mesmo sem haver melhoria na solução; (iii) a taxa de decréscimo da temperatura; (iv) o número de decréscimos de temperatura antes de se finalizar o algoritmo.

## CONCLUSÕES

É enorme a variedade de modelos que estudam a otimização da qualidade regional da água de uma bacia, desde a definição de seus objetivos, passando pela forma como é considerada a qualidade da água, a estocasticidade das variáveis e o modelo de otimização utilizado. Para esse último caso, a tendência atual parece ser a utilização de algoritmos metaheurísticos. Quanto aos outros fatores, é preciso haver um compromisso entre detalhamento do modelo e a sua aplicabilidade, seja quanto à necessidade de informações, seja quanto ao intuito que venham a ser aplicados em situações reais de planejamento.

## Referências

- ALI, M.K., 2002. **Stream Water Quality Management: A Stochastic Mixed-Integer Programming Model**. PhD Dissertation. University, West Virginia. 132p.
- ANDERSON, M.W.; DAY, H.J., 1968. Regional management of water quality – a systems approach. **Journal of the Water Pollution Control Federation**. Washington, v.40, n.10, p.1679-1687.

- ARBABI, M.; ELZINGA, J. 1975. A general linear approach to stream water quality modeling. **Water Resources Research**. Washington, v.11, n.2, p.191-196.
- ARMSTRONG, J.M. 1976. Dynamic programming model for wastewater plant investment. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.102, n.5, p.985-1003.
- BISHOP, A.B.; GRENNEY, W.J. 1976. Coupled optimization-simulation water quality model. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v. 102, n. 5, p. 1071-1086.
- BRILL, E.D.; Jr., LIEBMAN; J.C., REVELLE, C.S. 1976. Equity measures for exploring water quality management alternatives. **Water Resources Research**, Washington, v.12, n.5, p.845-851.
- BRILL, E.D., Jr.; NAKAMURA, M. 1978. A branch and bound method for use in planning regional wastewater treatment systems. **Water Resources Research**, Washington, v.14, n.1, p.109-118.
- BROWN, L.C.; BARNWELL, T.O., Jr. (1987). **The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user's manual**, U.S: EPA. Report EPA/600/3-87-007.
- BURN, D.H.; McBEAN E.A. 1985. Optimization Modeling of Water Quality in an Uncertain Environment, **Water Resources Research**, Washington, v.21, n.6, p.934-940.
- BURN, D.H.; McBEAN, E.A. 1987. Application of Nonlinear Optimization to Water Quality. **Appl. Math. Modelling**, v.11, p.438-446.
- BURN, D.H.; LENCE, B.J. 1992. Comparison of optimization formulations for waste-load allocations. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.118, n.4, p.597-612.
- BURN, D.H.; YULANTI, J.S. 2001. Waste-load allocation using genetic algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 127, n. 2, p. 121-129.
- CARDWELL H., ELLIS H. 1993. Stochastic Dynamic Programming for Water Quality Management, **Water Resources Research**. Washington, v.29, n.4, p. 803-813.
- CARMICHAEL, J.J.; STRZEPEK, K.M. 2000. A Multiple-Organic-Pollutant Simulation/Optimization Model of Industrial and Municipal Wastewater Loading to a Riverine Environment. **Water Resources Research**. Washington, v. 36, n. 5, p. 1325-1332.
- CHANG, N.B.; CHEN, H.W.; YANG, C.H., 1997. Water Pollution Control in River Basin by Interactive Fuzzy Interval Multiobjective Programming. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v. 123, n. 12, p. 1208-1216.
- CHANG, S.Y.; BRILL, E.D.; Jr., HOPKINS, L.D. 1982. Use of mathematical models to generate alternative solutions to water resources planning problems. **Water Resources Research**, Washington, v.18, n.1, p.58-64.
- CHIANG, C.H.; LAURIA, D.T. 1977. Heuristic algorithm for wastewater planning. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.103, n.5, p.863-876.
- CONVERSE, A. O. 1972. Optimum number and location of treatment plants. **Journal of the Water Pollution Control Federation**. Washington, v.44, n.8, p.1629-1636.
- CUNHA, M.C.; SOUZA, J. 1999. Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 125, n. 4, p. 215-221.
- CUNHA, M. C.; PINHEIRO, L.; AFONSO, P.; SOUZA, J. 2004. **Decision-aid Models for the Implementation of the Water Framework Directive**, Porto: DMUCE, 10p.
- CUNHA, M. C.; PINHEIRO, L.; AFONSO, P.; SOUZA, J. 2005. A importância dos modelos de apoio à decisão para a implementação da directiva quadro da água. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 7 SILUSBA, Évora.
- DEININGER, R.A. (ed). 1973. **Models for Environmental Pollution Control**. EUA: Science Publishers Inc., 448p.
- DEININGER, R.A. 1965. Water Quality Management: The Planning of Economically Optimum Pollution Control Systems. **Proceedings**. Annual Water Resources Conf. Chicago, Ill. In: American Water Resources Association, 13: 1965: Chicago. p. 254-282.
- DEININGER, R.A.; SU, S.Y. 1973. Modelling regional waste water treatment systems. **Water Research**, v.7, n.4, p. 633-646.
- DORFMAN, R.; JACOBY, H.D.; THOMAS, H.A. Jr., (eds), 1972. **Models for Managing Regional Water Quality**. Cambridge: Harvard University Press, Ma. 453.p.
- DOWNEY, E. BRILL, Jr.; LIEBMAN, J.; REVELLE, C., 1976. Equity measures for exploring water quality management alternatives. **Water Resources Research**. Washington, v. 12, n.5, p.845-851.
- ECKER, J., 1975. A geometric programming model for optimal allocation of stream dissolved oxygen. **Management Science**. Evanston, v.21, n.6, p.658-668.
- EFSTRATIADIS, A.; KOUTSOYIANNIS, D. 2002. An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimization of water resource systems. In: International Conference on Hydroinformatics, 5., 2002, Cardiff, UK. **Proceedings...** Cardiff, UK
- ELLIS, J.H. 1987. Stochastic Water Quality Optimization Using Embedded Chance Constraints, **Water Resources Research**. Washington, v. 23, n.12, p.2227-2238.

- FUJIWARA, O., GNANENDRAN, S.K., OHGAKI, S., 1986. River quality management under stochastic streamflow. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.112, n.2, p. 185-198.
- FUJIWARA, O.; GNANENDRAN, S.K.; OHGAKI, S. 1987. Chance constrained model for river water quality management. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.113, n.5, p. 1018-1031.
- FUJIWARA, O.; PUANGMAHA, W.; HANAKI, K. 1988. River basin water quality management in stochastic environment. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.114, n.4, p. 864-877.
- GOODMAN, A.S.; DOBBINS, W.E. 1966. Mathematical model for water pollution control studies. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, Reston, v.92, n.6, p. 1-19.
- GRAVES, G.W.; HATFIELD, G.B.; WHINSTON, A.B. 1969. Water pollution control using by-pass piping. **Water Resources Research**, Washington, v.5, n.1, p.13-47.
- GRAVES, G.W.; HATFIELD, G.B.; WHINSTON, A.B. 1972. Mathematical programming for regional water quality management. **Water Resources Research**, Washington, v.8, n.2, p.273-290.
- HAIMES, Y.Y.; KAPLAN, M.A.; HUSAR Jr., M.A. 1972. A multilevel approach to determining optimal taxation for the abatement of water pollution. **Water Resources Research**, Washington, v.8, n.4, p.851-860.
- HAITH, D.A., 1982. **Environmental Systems Optimization**. New York: EUA :John Wiley & Sons, 306 p.
- HYDEN, J.W.; CHISMAN, J.A.; MACAULAY, H.H. 1975. Simulation of water quality management policies. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.101, n.4, p. 623-641.
- JOERES, E.F.; DRESSLER, J.; CHO, C.C.; FALKNER, C.H. 1974. Planning methodology for the design of regional wastewater treatment systems. **Water Resources Research**. Washington, v.10. n.4, p. 643-649.
- JOHNSON, E.L., 1967. A Study in the Economics of Water Quality Management. **Water Resources Research**. Washington, v.3, n.32, p.291-305.
- KERRI, K.D., 1966. A Dynamic Model for Water Quality Control. **Journal of the Water Pollution Control Federation**. Middleburg, v.39, n.5, p. 772-786.
- KLEMETSON, S.L., GRENNEY, W.J., 1985. Dynamic optimization of regional wastewater treatment systems. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, Middleburg, v.57, n.2, p.128-134.
- LENCE, B.J.; EHEART, J.W.; BRILL, E.D. Jr. 1990. Risk equivalent discharge programs for multidischarger streams. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Reston, v.116, n.2, p.170-186.
- LEIGHTON, J.P.; SHOEMAKER, C.A., 1984. An integer programming analysis of the regionalization of large wastewater treatment and collection systems. **Water Resources Research**. Washington, v.20, n.6, p.671-681.
- LIEBMAN, J.C.; LYNN, W.R., 1966. The optimal allocation of stream dissolved oxygen. **Water Resources Research**. Washington, v.2, n.3, p.581-591.
- LIEBMAN, J.C.; MARKS, D.H., 1968. "BALAS" algorithm for zoned uniform treatment. **Journal of the Sanitary Engineering Division**, Reston, v.94, n.4, p.585-593.
- LOHANI, B.N.; THANH, N.C., 1978. Stochastic programming model for water quality. **Journal of the Water Pollution Control Federation**. Washington, v.50, n.9, p.2175-2182.
- LOHANI, B.N.; THANH, N.C., 1979. Probabilistic water quality control policies. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.105, n.4, p.713-725.
- LOUCKS, D.P.; STEDINGER, J.R.; HAITH, D.A., 1981. **Water Resources Systems Planning and Analysis**. EUA: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 559p.
- LOUCKS, D.P.; LYNN, W.R., 1966. Probabilistic Models for Predicting Stream Quality. **Water Resources Research**. Washington, v.2, n.3, p.593-605.
- LUCIA, R. de; MCBEAN, E.; HARRINGTON, J. 1978. A water quality planning model with multiple time, pollutant and source capabilities. **Water Resources Research**. Washington, v.14, n.1, p.9-14.
- MANDL, C.E., 1981. A survey of mathematical optimization models and algorithms for designing and extending irrigation and wastewater networks. **Water Resources Research**. Washington, v.17, n.4, p.769-775.
- MCCONAGHA, D.L.; CONVERSE, A.O. 1973. Design and cost allocation algorithm for waste treatment systems. **Journal of the Water Pollution Control Federation**. Washington, v.45, n.12, p. 2558-2566.
- MCNAMARA, J.R., 1976. An optimization model for regional water quality management. **Water Resources Research**. Washington, v.12, n. 2, p.125- 134.
- MELO, J.M.D.J., 1992. **Optimização de sistemas regionalizados de tratamento de águas residuais – o modelo OPTTAR**. Tese (doutorado), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 170p.
- MELO, J.J., CÂMARA, A.S., 1994. Models for the Optimization of Regional Wastewater Treatment Systems. **European Journal of Operational Research**, vol. 73, p. 1-16.

- METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, M.; ROSENBLUTH, A.; TELLERA, TELLER, E. (1953). Equations of state calculations by fast computing machines. **Journal of Chemical Physics**, v. 21, p.1087-1092.
- MUJUMDAR, P.P.; SASIKUMAR, K. 2002. A Fuzzy Risk Approach for Seasonal Water Quality Management of a River System. **Water Resources Research**. Washington, v.38, n.1, p.5.1-5.9.
- MUJUMDAR, P.P.; VEMULA, V.R.S. 2004. Fuzzy Waste Load Allocation Model: Simulation-Optimization Approach. **Journal of Computing in Civil Engineering**. Reston, v. 18, n. 2, p. 120-131.
- NAKAMURA, M.; BRILL; JR. E.D. 1979. Generation and Evaluation of Alternative Plans for Regional Wastewater Systems: An Imputed Value Method. **Water Resources Research**. Washington, v. 15, n.4, p. 750-756.
- NAKAMURA, M.; BRILL, E.D.; LIEBMAN, J.C. 1981. Multiperiod design of regional wastewater systems: generating and evaluating alternative plans. **Water Resources Research**. Washington, v.17, n.5, p. 1339-1348.
- ONG, S.L. 1983. **Capacity Expansion for Regional Wastewater Treatment Systems**. Ph.D.Dissertation, University of Toronto.
- PHILLIPS, K.S.; BELTRAMI, E.J.; CARROLL, T.O.; KELLOGG, S.R. 1982. Optimization of area wide wastewater management. **Journal of the Water Pollution Control Federation**. Washington, v.54, n.1, p. 87-93.
- REVELLE, C.S.; LOUCKS. D.P.; LYNN, W.R. 1967. A management model for water quality control. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, Washington, v.39, n.7, p. 1164-1183.
- REVELLE, C.S.; LOUCKS. D.P.; LYNN, W.R. 1968. Linear Programming Applied to Water Quality Management. **Water Resources Research**. Washington, v.4, n.1, p.1-9.
- REVELLE, C.; MCGARITY, A.E. 1997. **Design and Operation of Civil and Environmental Engineering Systems**. New York, EUA : John Wiley & Sons. 772p.
- REVELLE, C.S., 2000. Research challenges in environmental management. **European Journal of Operational Research**, v. 121, p. 218-231.
- REVELLE, C.S.; WHITLATCH, E.E.; WRIGHT, J.F. 2003. **Civil and Environmental Systems Engineering**. Nova Jersey, EUA: Pearson Prentice Hall. 552p.
- RINALDI, S. SONCINI-SESSA; R., STEHFEST, H.; TAMURA, H. 1979. **Modeling and Control of River Quality**. New York, EUA: McGraw-Hill, Inc. 380p.
- ROSSMAN, L.A. 1978. Planning time-phased regional treatment systems. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.104, n.4, p.685-700.
- ROSSMAN, L.A. 1989. Risk Equivalent Seasonal Waste Load Allocation. **Water Resources Research**. Washington, v.25, n.10, p. 2083-2090.
- SASIKUMAR, K. MUJUMDAR, P.P., 1998. Fuzzy optimization model for water quality management of a river system. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Reston, v.124, n.2, p.79-88.
- SMEERS, Y.; TYTECA, D. 1982. Optimal location and design of wastewater treatment plants under river quality constraints. In: RINALDI, S. (ed.), **Environmental Systems Analysis and Management**. North Holland : Publishing Company, p.289-310.
- SMITH, E.T.; MORRIS, A.R. 1969. Systems analysis for optimal water quality management. **Journal of the Water Pollution Control Federation**. Washington, v.41, n.9, p.1635-1646.
- SOBEL, M.J. 1965. Water Quality Improvement Problems, **Water Resources Research**. Washington, v.1, n.4, 477-487.
- SOUZA, J.J.O; CUNHA, M.C.M.O. 1999. Soluções otimizadas para sistemas regionais de águas residuais: a utilização do método do reconhecimento simulado. SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 4. : Coimbra. **Comunicações**. Coimbra : APRH. 1 Cd Rom
- SOUZA, J.; RIBEIRO, A.; CUNHA, M.C.; ANTUNES, A. Na optimization approach to wastewater systems planning at the regional level. **Journal of Hydroinformatics**, vol.4, n.2, p. 115-123.
- TAKYI, A.K. ; LENCE, B.J. 1995. Markov chain models for seasonal-water quality management. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Reston, v.121, n.2, p.144-157.
- TAKYI, A.K. ; LENCE, B.J. 1995. Chebyshev model for water-quality management. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Reston, v.122, n.1, p.40-48.
- TAKYI, A.K. ; LENCE, B.J. 1999. Surface Water Quality Management Using a Multiple-Realization Chance Constraint Model. **Water Resources Research**. Washington, v.35, n.5, p.1657-1670.
- THOMANN, R.V. 1972. **Systems Analysis & Water Quality Management**. , New York, EUA: McGraw-Hill, Inc., 286p.
- THOMANN, R.V.; MUELLER, J.A., 1987. **Principles of Surface Water Quality Modeling and Control**. New York, EUA: Harper & Row, Publishers, 644p.
- TUNG, Y-K. ; HATHHORN, W.E. 1990. Stochastic waste load allocation. **Ecological Modeling**, Amsterdam, v. 51, p.29-46.
- VEMULA, V.R.S. ; MUJUMDAR, P.P. ; GHOSH, S. 2004. Risk Evaluation in Water Quality Management of a River System. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Reston, v. 130, n.5, p. 411-422.

VOUTCHKOV, N.S. ; BOULOS, P.F. 1993. Heuristic screening methodology for regional wastewater-treatment planning. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.119, n.4, p.603-614.

UNAMI, K.; KAWACHI, T. 2003. Universal optimization of water quality strategy. **Advances in Water Resources**. ESSEX, v.26, p. 465-472.

WANIELISTA, M.P.; BAUER, C.S. 1972. Centralization of waste treatment facilities. **Journal of the Water Pollution Control Federation**. Washington, v.44 , n.12, p. 2229-2238.

WEETER, D.W.; BELARDI, J.G, 1976. Analysis of regional waste treatment systems. **Journal of the Environmental Engineering Division**, Reston, v.102, n.1, p.233-237.

WHITLATCH, E.E.; JR. REVELLE, C.S. 1976. Designing regionalized waste water treatment systems. **Water Resources Research**. Washington, v.12, n. 4, p.581-591.

ZHU, Z., REVELLE, C. 1988. A siting model for regional wastewater treatment systems: the chain configuration case. **Water Resources Research**. Washington, v.24, n.1, p. 137-144.

**Enéas Souza Machado** Engenheiro Civil, Universidade de São Paulo, *Brasil*, sm.eneas@gmail.com

**Maria da Conceição Cunha** Engenheira Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, *Portugal*, mccunha@dec.uc.pt

**Mônica Porto** Engenheira Civil, Universidade de São Paulo, *Brasil*, mporto@usp.br