ICTR 2004 – CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
Costão do Santinho – Florianópolis – Santa Catarina

INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE NA DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS POLUENTES EM RIOS URBANOS

Carla Freitas de Andrade
Raimundo Oliveira de Souza

PRÓXIMA

Realização:

ICTR – Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável
NISAM - USP – Núcleo de Informações em Saúde Ambiental da USP

INFLUÊNCIA DA DECLIVIDADE NA DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS POLUENTES EM RIOS URBANOS

Carla Freitas de Andrade [2] *, Raimundo Oliveira de Souza* [3]

Resumo - Com o objetivo de analisar o comportamento da concentração de uma substância poluente em rios urbanos, sujeito à propagação de uma onda cinemática, formulou-se um modelo matemático, baseado nas Equações da Hidrodinâmica, combinadas com a Equação da Difusão Advectiva. Para a solução das equações diferenciais contidas no modelo, o Método das Diferenças Finitas foi aplicado. Um programa computacional QUARI (Análise da Qualidade da Água em Rios Urbanos), escrito em linguagem FORTRAN 90, desenvolvido para esta pesquisa, foi usado para a realização das simulações. A eficiência e a versatilidade do programa computacional QUARI foram avaliadas através da comparação dos resultados obtidos na análise de vários exemplos com outros resultados registrados da literatura, constatando-se uma excelente concordância. Através do programa QUARI, foram realizadas várias simulações variando a declividade para avaliar a influência desse parâmetro na distribuição da concentração. Os resultados mostram que o comportamento da concentração sofre forte influência desse parâmetro hidráulico, determinante no regime de escoamento destes corpos d'água.

Palavras-chave: hidráulica de canais, modelagem de qualidade de água, qualidade de água em rios urbanos, declividade de canais.

(2) *Doutoranda em Recursos Hídricos – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 288.9771, (85) 234.3608. Fax: (85) 288.9627 – e-mail: engenheiracarla@yahoo.com*

(3) *Professor PHD - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici – Bloco 713 – Fortaleza, Ceará – Brasil – CEP 60.451-970 – Fone: (85) 288.9771. Fax: (85) 288.9627 – e-mail: rsouza@ufc.br*

INTRODUÇÃO

Os problemas decorrentes da escassez dos Recursos Hídricos no Nordeste brasileiro têm sido um limitador para o seu desenvolvimento, como é do conhecimento de toda a sociedade, pois tem sido divulgado através da imprensa, que o volume d'água disponível para atender os mais diversos usos, além de não ser suficiente, não possui distribuição adequada no tempo e no espaço.

Com a finalidade de atenuar esses problemas, um programa de gestão, que permita um processo de desenvolvimento com sustentabilidade, tem sido solicitado por parte das autoridades governamentais.

O presente trabalho, visa desenvolver um estudo, através de um modelo matemático, que permita avaliar o comportamento dos processos de transporte, em escoamento não permanente de um curso d'água, como função de um dos parâmetros do rio, a declividade, estabelecendo relações entre a declividade do rio e a capacidade de assimilação das cargas poluidoras.

O modelo matemático está baseado nas leis que governam os processos de transporte de massa que são a Lei da Conservação de Massa e a Lei de Fick. Normalmente, na análise de um problema hidroambiental, onde uma massa poluente é lançada, através de uma fonte puntiforme ou difusa, em um meio aquático, há a necessidade de se estabelecer uma forma de estudo do comportamento desta massa dentro do sistema fluido.

Conjuntamente com o modelo advectivo-difusivo, estão os modelos hidrodinâmicos, para estudar o comportamento dos parâmetros de qualidade da água nos escoamentos não permanentes do corpo d'água. Este modelo será descrito pelas equações de Saint-Venant, que representam os princípios de conservação de massa e quantidade de movimento e resolvido por um método numérico.

Nesta formulação numérica, o método a ser usado será o Método das Diferenças Finitas, por ser considerado um dos mais simples, versáteis e eficientes métodos numéricos na solução dos mais variados e complexos problemas práticos nas várias áreas de engenharia e por ser o mais antigo, o mais divulgado e, provavelmente, o mais bem entendido pelos engenheiros em geral (ANDRADE, 2003, p.71).

Desenvolvido o modelo, é capaz de simular o comportamento de rios urbanos, quando sujeitos ao lançamento de cargas poluidoras, permitindo avaliar os níveis de concentração de determinados poluentes pré-estabelecidos e a influência da declividade sobre a concentração.

METODOLOGIA

Teorema de transporte de Reynolds

O movimento da água em um sistema hidrológico é influenciado pelas propriedades físicas do sistema, tais como o tamanho e a forma de sua trajetória de escoamento, e pela interação da água com o meio, incluindo a energia do ar e do calor. Muitas leis físicas governam a operação dos sistemas hidrológicos. Um mecanismo consistente, necessário para desenvolver modelos hidrológicos, é fornecido pelo teorema de transporte de Reynolds.

O teorema de transporte de Reynolds é dado pela expressão

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt}\iiint_{V.C} W\rho.d\forall + \iint_{S.C} W\rho.U.dA, \tag{1}$$

onde *B* é uma propriedade extensiva; *W* é uma propriedade intensiva correspondente; *t* é o tempo; *ρ* é a densidade do fluido; $d\forall$ é um elemento de volume de controle (*VC)*; *U* é a velocidade do fluido; e o vetor *dA* tem direção normal ao elemento de área *dA*, apontando para fora da superfície de controle *(SC)*. Portanto, o produto escalar *U.dA* tem sempre valor negativo para influxo e tem sempre valor positivo na situação de efluxo.

O teorema de transporte de Reynolds é usado para desenvolver as equações de continuidade, quantidade de movimento e energia para os vários processos hidrológicos. Através deste teorema, as leis físicas, que são normalmente aplicadas a uma massa isolada de uma substância, são aplicadas a um fluido escoando continuamente através de um volume de controle.

A equação da continuidade é expressa pela equação

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0. \tag{2}$$

onde $\frac{\partial Q}{\partial x}$ é a variação da vazão no canal com relação à distância, *A* é a área média da seção transversal, e *q* é o influxo lateral.

A equação da quantidade de movimento para um escoamento não permanente e não uniforme tem a seguinte forma:

$$-\frac{1}{A}\frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{1}{A}\frac{\partial (Q^2/A)}{\partial x} - g\frac{\partial y}{\partial x} + gS_0 = gS_f \ , \tag{3}$$

onde S_0 é a declividade do fundo do canal; S_f é a declividade de atrito; y é a profundidade da água ao longo do canal; e *g* é a aceleração da gravidade.

Considerando todos os termos nas Equações (3), tem-se a situação do escoamento não permanente e não uniforme; excluindo o primeiro termo, tem-se a situação do escoamento permanente e não uniforme; e considerando apenas os dois últimos termos, tem-se o caso do escoamento permanente e uniforme, isto é, $S_0 = S_f$.

Os modelos podem ser divididos em modelos da onda cinemática e modelos de transporte de massa. Os primeiros fazem simulações do escoamento da água levando em conta os fluxos naturais. Os modelos de transporte de massa analisam o transporte e espalhamento da substância poluente que atingiu um curso de água.

Modelo da onda cinemática

As ondas cinemáticas governam o escoamento quando as forças de pressão e as forças inerciais não são importantes. No modelo da onda cinemática, o escoamento não tem aceleração apreciável e os termos correspondentes às forças de pressão e às forças inerciais são desprezados, de sorte que a equação da quantidade de movimento assume sua forma mais simplificada possível, isto é, supõe-se que $S_0 = S_f$ e as forças de atrito e gravidade se compensam. Tal equação simplificada, associada à equação da continuidade, constitui a formulação básica da propagação da onda cinemática. Neste caso, a linha de energia é paralela ao fundo do canal.

A equação da quantidade de movimento pode também ser expressa na forma

$$A = \alpha Q^{\beta}, \qquad (4)$$

onde *A* é a área da seção transversal do canal, *Q* é a vazão e α e β são coeficientes que podem ser obtidos a partir da fórmula de Manning.

Para $S_0 = S_f$ e $R = A/P$, onde *R* é o raio hidráulico e *P* é o perímetro molhado, a fórmula de Manning fornece

$$A = \left(\frac{nP^{2/3}}{\sqrt{S_0}}\right)^{3/5} Q^{3/5}, \qquad (5)$$

de onde, comparando-se as Equações (4) e (5), resulta em $\alpha = [nP^{2/3}/(\sqrt{S_0})]^{0,6}$ e $\beta = 0{,}6$, sendo *n* o coeficiente de rugosidade de Manning.

Neste tabalho, o valor de α será alterado, pois a declividade é o parâmetro em estudo e este será variado para se saber a sua influência no estudo da concetração de substâncias poluentes.

A Equação (2) contém duas variáveis dependentes, *A* e *Q*, que torna mais difícil encontrar a sua solução. Entretanto, a variável *A* pode ser eliminada, derivando-se a Equação (4) e substituindo na Equação (2), resultando em:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha\beta Q^{\beta\text{-}1}\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right) = q \qquad (6)$$

A equação diferencial acima, com uma única variável dependente, *Q*, é equivalente ao sistema de duas equações formado por $S_0 = S_f$ e pela Equação (2). A solução numérica desta equação determinará, no presente estudo, os valores da vazão no canal de um rio sob a influência de uma onda cinemática, cujos valores serão substituídos na equação de transporte de massa para obter os valores de concentração para os diferentes pontos do rio, sabendo-se que o valor da declividade será variado e será criada diferentes situações para avaliar a sua influência na capacidade de autodepuração do curso de água.

Aspectos do transporte de poluentes

Vários tipos de movimento da água transportam matéria dentro de águas naturais, mas existem dois mecanismos básicos que são responsáveis pelo transporte dos solutos dissolvidos e suspensos em água naturais, a saber:

(a) advecção: resulta do escoamento unidimensional e não muda a identidade da substância que está sendo transportada (CHAPRA, 1997, p. 138). De acordo com CHOW, MAIDMENT e MAYS (1988, p. 285), a advecção se refere ao transporte devido ao movimento bruto da água que contém o soluto.

(b) difusão: se refere ao movimento de massa devido ao movimento aleatório da água ou da mistura (CHAPRA, 1997, p. 138). Conforme CHOW, MAIDMENT e MAYS (1988, p. 285), a difusão é o transporte não advectivo devido à migração de um soluto em resposta a um gradiente de concentração.

Para descrever um processo de transporte, deve-se aplicar a combinação da Lei de Fick com a Lei da Conservação das massas, cuja formulação para avaliar o comportamento de um campo de concentração em um fluido escoando em um regime turbulento qualquer, pode ser apresentada na forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + kC\,, \tag{7}$$

onde *C* representa o campo de concentração da substância estudada; E_x é o coeficiente de difusão turbulenta na direção *x* ; e *kC* representa uma fonte ou um sumidouro de massa.

Para rios, uma boa aproximação para o coeficiente de dispersão é formulada por (CHAPRA, 1997, p. 246)

$$E = \frac{0{,}05937}{S_o b} Q\,, \tag{8}$$

onde *b* é a largura do canal.

A solução numérica da Equação (7) será obtida pelo método das diferenças finitas.

Formulação numérica

As equações diferenciais que serão empregadas na análise do problema, de um modo geral, não têm solução analítica simples. Portanto, os engenheiros têm preferido o emprego de técnicas numéricas para a obtenção da solução de tais equações. Nesta formulação numérica, o método a ser usado na solução do programa computacional escrito em linguagem FORTRAN 90 é o método das diferenças finitas.

Esquema de solução da onda cinemática

Como já mostrado na Equação (6), a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento para a onda cinemática foram combinadas para produzir uma equação com uma única variável dependente *Q*.

O objetivo principal é obter a solução numérica da Equação (6), para determinar o valor de *Q(x, t)* em cada ponto da malha *x – t*, dados os parâmetros do canal α e β, o influxo lateral *q,* as condições iniciais *Q(x,0)* e as condições de contorno *Q(0,t).*

Para a obtenção da solução numérica da Equação (6), as derivadas parciais de *Q* com relação a *t* e com relação a *x*, a vazão *Q* e o influxo lateral *q* são substituídos por expressões aproximadas contendo diferenças finitas apropriadas.

No esquema adotado para a avaliação das diferenças finitas, são considerados conhecidos os valores da vazão Q_i^{j+1} e Q_{i+1}^{j} e os valores do influxo lateral q_{i+1}^{j} e q_{i+1}^{j+1}. São considerados desconhecidos e, portanto, a determinar, os valores da vazão Q_{i+1}^{j+1}. Os valores da vazão nos pontos da malha para a onda cinemática são determinados através de

$$Q_{i+1}^{j+1} = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha\beta Q_{i+1}^{j} \left(\left(\frac{Q_{i+1}^{j} + Q_i^{j+1}}{2} \right) \right)^{\beta - 1} + \Delta t \left(\left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^{j}}{2} \right) \right) \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha\beta \left(\left(\frac{Q_{i+1}^{j} + Q_i^{j+1}}{2} \right) \right)^{\beta - 1} \right]}$$

(9)

Solução para o processo de advecção e difusão/dispersão

Cada termo da Equação (7) também é substituído por uma expressão aproximada, com base em um determinado esquema de diferenças finitas.

Após as devidas substituições, a Equação (7) se transforma em (ANDRADE, 2003, p. 81)

$$\frac{C_i^{j+1} - C_i^{j}}{\Delta t} + \frac{1}{4\Delta x}\left[U_i^{j}(C_{i+1}^{j} - C_{i-1}^{j}) + U_i^{j+1}(C_{i+1}^{j+1} - C_{i-1}^{j+1})\right] + \frac{k}{2}(C_i^{j} + C_i^{j+1}) -$$

$$\frac{1}{2\Delta x^2}\left[E_i^{j}(C_{i+1}^{j} - 2C_i^{j} + C_{i-1}^{j}) + E_i^{j+1}(C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1})\right] = 0 \qquad (10)$$

onde Δx e Δt definem a malha *x - t*.

Observando que $U = \dfrac{Q}{A}$ e $E = \dfrac{0{,}05937}{S_o b} Q$, chega-se à equação final.

$$-[\alpha_1 (Q_i^{j+1})^{1-\beta} + \alpha_3 Q_i^{j+1}] C_{i-1}^{j+1} + (1 + \alpha_2 + 2\alpha_3 Q_i^{j+1}) C_i^{j+1} + [\alpha_1 (Q_i^{j+1})^{1-\beta} - \alpha_3 Q_i^{j+1}] C_{i+1}^{j+1} =$$

$$(1 - \alpha_1) C_i^j - \alpha_1 (Q_i^j)^{1-\beta} (C_{i+1}^j - C_{i-1}^j) + \alpha_3 Q_i^j (C_{i+1}^j - 2C_i^j + C_{i-1}^j), \qquad (11)$$

onde $\alpha_1 = \dfrac{\Delta t}{4\alpha \Delta x}$, $\alpha_2 = \dfrac{k\Delta t}{2}$ e $\alpha_3 = \dfrac{0{,}05937\Delta t}{2 S_o b \Delta x^2}$.

O esquema para determinar a concentração, tem como termos conhecidos os valores da função nos pontos *(i-1, j), (i, j), (i+1, j),* e o valor da função (concentração) é desconhecido nos pontos *(i-1, j+1), (i, j+1), (i+1, j+1),* usando um esquema de diferença finita progressiva e um esquema de diferença finita central.

RESULTADOS

Serão discutidos os vários resultados com relação aos valores da concentração, obtidos a partir de um conjunto de simulações, onde se variou a declividade, de modo a avaliar o comportamento da concentração em rios urbanos.

Simulações para o estudo da concentração

Inicialmente, para verificar a eficiência do programa computacional QUARI, escrito em linguagem FORTRAN 90, comparou-se os resultados gerados pelo programa com os resultados obtidos, também numericamente, por um modelo proposto por CHOW, MAIDMENT e MAYS (1988), e observou-se uma excelente concordância entre os dois resultados, não se distinguindo, praticamente, os dois resultados obtidos.

Para o estudo do comportamento da concentração, devido às influências de uma onda cinemática e da declividade, será mostrado os resultados obtidos através de várias simulações.

A Figura 1 mostra os resultados da influência da propagação de uma onda cinemática despoluída, sobre uma concentração constante de 100 mg/l no canal.

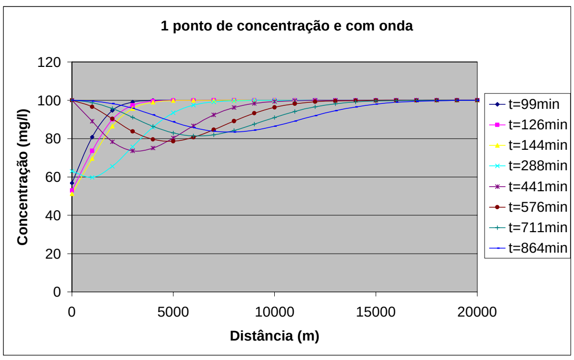

Figura 1. Distribuição da concentração

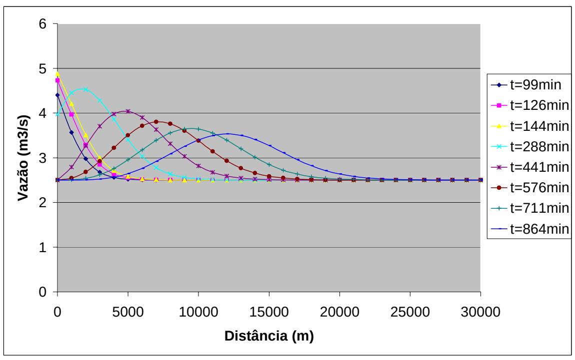

Figura 2. Distribuição da vazão após o

após o lançamento de 100 mg/l de um poluente ao longo do canal

lançamento de 100 mg/l de um poluente ao longo do canal

Observando a Figura 1, verifica-se que, à medida que a onda se propaga ao longo do canal, há uma redução de concentração, cuja variação tem a mesma semelhança da onda em propagação. Desta forma, percebe-se que a onda cinemática estabelece uma onda de diluição com diferentes fases de propagação.

A explicação física que permite justificar esta redução nos valores da concentração está relacionada com a capacidade de diluição dos corpos de água com maior vazão. Como se sabe, os corpos de água com maior vazão têm capacidade de autodepuração maior. Através da Equação 7, verifica-se que a vazão atua diretamente no processo de transporte advectivo e no processo de transporte difusivo, fato que plenamente justifica os resultados encontrados.

As Figuras 3, 4 e 5 mostram o comportamento da concentração sob a influência de uma onda cinemática para diferentes declividades, em diferentes intervalos de tempo, considerando uma rugosidade de 0,070. Verifica-se que a declividade influi diretamente no comportamento da concentração, reduzindo a capacidade de diluição com a redução da declividade. Isto mostra que, por exemplo, rios urbanos, que sofrem severos impactos em seus leitos causados pela intervenção do homem, reduzindo suas declividades, têm sua capacidade de diluição reduzida, aumentando, assim, o risco de poluição e contaminação.

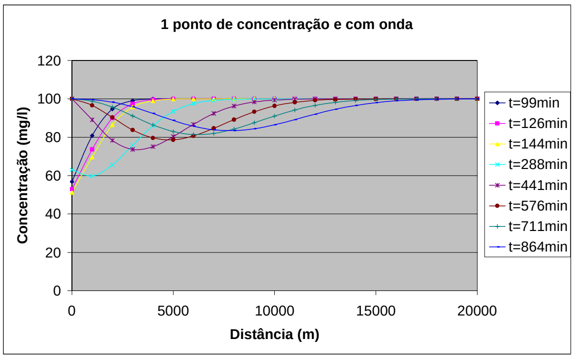

Figura 3. Distribuição da concentração para declividade de 0.0001 m/m

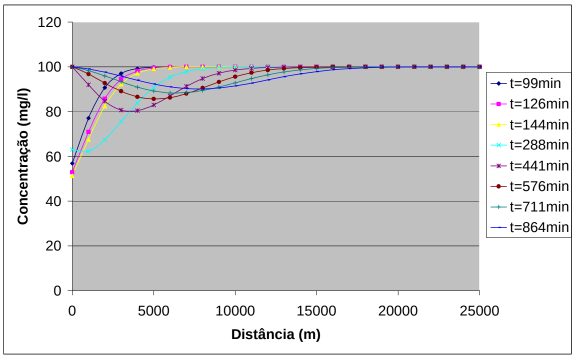

Figura 4. Distribuição da concentração para declividade de 0.00005 m/m

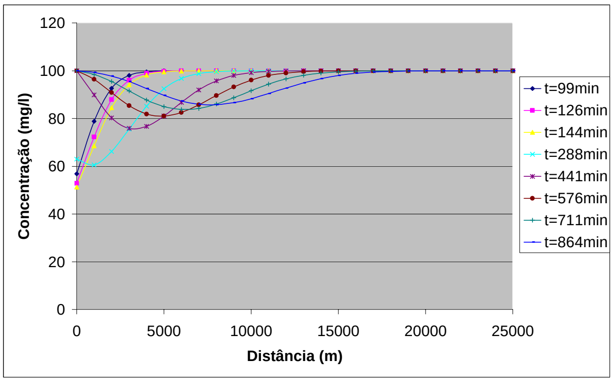

Figura 5. Distribuição da concentração para declividade de 0.00008 m/m

As Figuras 6 e 7 mostram, comparativamente, os resultados da distribuição da concentração para os intervalos de tempo de simulação de 441 minutos e 711 minutos, respectivamente, para as três diferentes declividades referidas nas Figuras 3, 4 e 5, considerando a mesma rugosidade de 0,070.

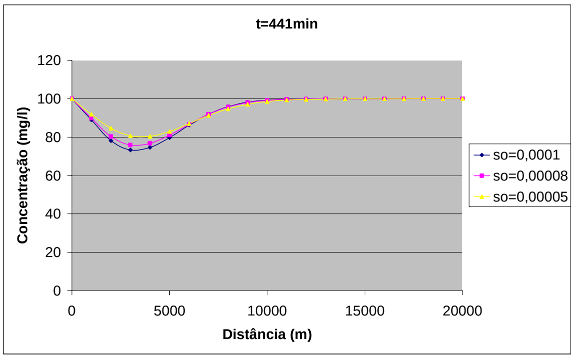

Figura 6. Distribuição da concentração para diferentes declividades em t = 441min.

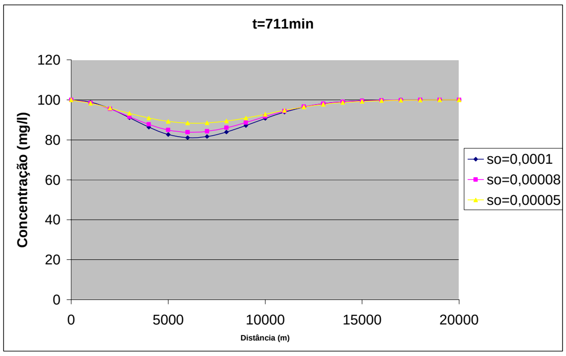

Figura 7. Distribuição da concentração para diferentes declividades em t = 711min.

Como se pode observar, uma série de simulações foi realizada através de um programa computacional desenvolvido, cujos resultados permitiram que se fizesse uma avaliação bastante consistente do comportamento da vazão e da concentração de poluentes em um rio sob o efeito de uma onda cinemática.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo, matemático-computacional desenvolvido, responde plenamente aos objetivos da pesquisa, com grande versatilidade e eficiência na solução das mais variadas situações práticas encontradas no campo de sua aplicabilidade;

Os resultados mostram que a declividade desempenha importante papel no processo de dispersão em rios. Os mesmos mostram que, quanto maior a declividade, maior o poder de diluição dos rios. Em conclusão, pode-se dizer que, rios urbanos sujeitos ao lançamento de substâncias com difícil poder de degradabilidade — que, em conseqüência, alteram para menos as declividades médias dos rios —, aumentam significativamente os riscos de contaminação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, Carla Freitas de. Aplicação dos Modelos Hidrodinâmicos para Estudar Índices de Poluição em Rios Urbanos, em Função dos Seus Parâmetros Hidráulicos. Fortaleza, 2003. 165fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará.

CHAPRA, Steven C. SURFACE-WATER QUALITY MODELING. New York: The McGraw Hill Companies, 1997.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. APPLIED HYDROLOGY, New York: McGraw-Hill, 1988.

Abstract - With the objective of analyzing the behavior of the concentration of a pollutant substance in urban rivers, subject to the propagation of a kinematic wave, a mathematical model was formulated, based on the Equations of Hydrodynamics, combined with the Equation of Transport Process. For the solution of the differential equations present in the model, the Finite Difference Method was applied. A computer program QUARI (Analysis of Water Quality in Urban Rivers), written in FORTRAN 90, developed for this research, was used for the accomplishment of the simulations. To evaluate the capability and efficiency of the computer program QUARI, several examples were analyzed and the results compared with other results presented in the literature, showing an excellent agreement. By using the computer code QUARI, several simulations varying the channel bottom slope were performed with the purpose to evaluate the influence of this hydraulic parameter on the concentration distribution. The results show that the behavior of the concentration distribution depends strongly on this hydraulic parameter that is decisive in the flow regime of these bodies of water.

Key – words: open channels hydraulics, water quality model, quality water in urban rivers, channels slope.