

**IV-095 - SENSIBILIDADE DO MODELO HIDRODINÂMICO RIVER 2D AOS
PARÂMETROS DE ENTRADA QUE COMPÕE O COEFICIENTE DE
VISCOSIDADE TURBULENTO: ESTUDO DE CASO EM PEQUENO CURSO
D'ÁGUA NO MUNICÍPIO DE JUIZ DE FORA, MG**

Vívian Gemiliano Pinto⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professora do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora. Doutoranda em Ecologia pela Universidade Federal de Juiz de Fora.

Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Juiz de Fora

Demetrius David da Silva

Graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa. Mestre e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Professor do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Ricardo Costa Pinto e Santos

Bacharel em Informática pela Universidade Federal de Juiz de Fora, Mestre em Sistemas Computacionais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Professor do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais – Campus Juiz de Fora.

Endereço⁽¹⁾: Rua Halfeld 1216 - Centro – Juiz de Fora - MG - CEP: 36016-321 - Brasil - Tel: (32) 3214-8828 - e-mail: vivian.pinto@ifsudestemg.edu.br

RESUMO

O modelo hidrodinâmico River 2D permite a modelagem hidrodinâmica em duas dimensões na horizontal, contexto em que distribuições de viscosidade turbulenta são importantes. Porém, a estabilidade de distribuições de viscosidade turbulenta transversais em soluções numéricas de diferenças finitas e de elementos finitos é, em alguns casos, difícil de ser atingida. O modelo hidrodinâmico River 2D considera que as tensões de cisalhamento transversal turbulento na profundidade média são modeladas com uma formulação de viscosidade turbulenta tipo Boussinesq, que considera que as tensões turbulentas são proporcionais ao gradiente de velocidade do escoamento principal, onde o coeficiente de proporcionalidade é chamado de viscosidade turbulenta. Este é assumido como sendo composto por três componentes: uma constante, um termo gerado pelo cisalhamento do leito e um termo gerado pelo cisalhamento transversal. O River2D permite ao usuário definir os parâmetros ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 que compõem o coeficiente de viscosidade turbulenta. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi testar quatro conjuntos de valores para os parâmetros ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 em um trecho do Córrego Taquaras, em Juiz de Fora, MG. Os testes realizados indicaram que alterações no parâmetro ϵ_1 podem refletir diretamente na estabilização do modelo, contudo, ao se determinar ϵ_1 igual a zero, mesmo alterando-se os coeficientes ϵ_2 e ϵ_3 , o modelo converge para a solução. Já os parâmetros ϵ_2 e ϵ_3 não apresentaram sensibilidade nos testes realizados, sugerindo-se que a análise de sensibilidade à viscosidade turbulenta seja associada a análise de sensibilidade da rugosidade, a fim de verificar se ao alterar a rugosidade os parâmetros implicam em alterações na estabilização do modelo.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de proporcionalidade, cisalhamento transversal turbulento, modelagem bidimensional.

INTRODUÇÃO

O modelo hidrodinâmico River 2D é um programa livre, desenvolvido na Universidade de Alberta, Canadá, que permite a modelagem hidrodinâmica de corpos d'água em duas dimensões por meio de uma malha de elementos finitos.

Distribuições de viscosidade turbulenta transversais são importantes para modelagem hidrodinâmica em duas dimensões na horizontal (2DH) e a sua estabilidade, em soluções numéricas de diferenças finitas e de elementos finitos, é em alguns casos, difícil de atingir, sendo atribuídos valores exageradamente grandes para esses parâmetros (Steffler, Blackburn 2002). O modelo hidrodinâmico River 2D considera que as tensões de cisalhamento transversal turbulento na profundidade média são modeladas com uma formulação de viscosidade turbulenta tipo Boussinesq, dada pela Equação 1. O conceito de viscosidade turbulenta proposto por Boussinesq em 1877 baseia-se em uma analogia com as tensões viscosas do escoamento laminar, considerando que as tensões turbulentas são proporcionais ao gradiente de velocidades do escoamento principal, onde o coeficiente de proporcionalidade é chamado de viscosidade turbulenta (Hinze 1959).

$$\tau_{xy} = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad \text{Equação 1}$$

O coeficiente de viscosidade turbulenta, ν_t , é assumido como sendo composto por três componentes: uma constante, um termo gerado pelo cisalhamento do leito, e um termo gerado pelo cisalhamento transversal, dado pela Equação 2 (Steffler, Blackburn 2002).

$$\nu_t = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \frac{H\sqrt{U^2+V^2}}{C_s} + \varepsilon_3 H^2 \sqrt{2 \frac{\partial U}{\partial x} + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial V}{\partial y}} \quad \text{Equação 2}$$

O River2D permite que o usuário defina os parâmetros ε_1 , ε_2 e ε_3 , que compõem o coeficiente de viscosidade turbulenta ν_t . Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi testar quatro conjuntos de valores para os parâmetros ε_1 , ε_2 e ε_3 em um trecho do Córrego Taquaras, em Juiz de Fora, MG.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo está localizada na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Espírito Santo, no Córrego Taquaras, cujas coordenadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Coordenadas Geodésicas e UTM - Datum Planimétrico: SIRGAS2000 das três seções de monitoramento

Seção	Latitude	Longitude	E (m)	N (m)	H (m)
S1	S 21°41'14,3572"	W 43°33'29,7134"	649153,814	7601087,938	714,17
S2	S 21°41'08,6434"	W 43°33'18,8163"	649468,651	7601260,733	713,62
S3	S 21°41'00,2419"	W 43°33'03,4056"	649913,999	7601514,963	712,46

A análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros que compõem o coeficiente de viscosidade foi testada para uma vazão de $0,48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com nível d'água em relação ao nível médio dos mares na seção de entrada de 712,86 m, 711,21 m na seção de saída e coeficientes de transmissividade e armazenamento de 0,1 e 1, respectivamente.

A malha de elementos finitos utilizada possuía 37.715 nós, 73.088 elementos e índice de qualidade igual a 0,42. O coeficiente de rugosidade efetiva K_s entre as seções 1 e 2 foi de 0,15 m, entre a seção 2 e o ponto de coordenadas UTM X igual a 649817,7 m e Y igual a 7601415,8 m (Fuso 23S) foi de 0,30 m e entre este ponto e a seção 3 de 0,50 m. Cabe destacar que a adoção do ponto auxiliar entre a seção 2 e a seção 3 ocorreu devido à existência de uma ponte no local, fazendo com que no trecho a jusante da mesma o córrego se tornasse menos largo e mais fundo, alterando o perímetro molhado e mudando o coeficiente de rugosidade efetiva.

Foram realizados quatro testes com quatro conjuntos de dados: para o teste 1 foi utilizado os valores padrões fornecidos pelo River 2D para os coeficientes ε_1 , ε_2 e ε_3 , 0, 0,5 e 0, respectivamente; para o teste 2, utilizaram-se os valores padrões, porém alterou-se ε_3 para 0,1, valor utilizado em versões anteriores do River 2D; para o teste 3 alterou-se o valor de ε_1 para 0,2, pois tal parâmetro pode ser utilizado para estabilizar a solução em

regiões muito rasas (Steffler, Blackburn 2002), quando o segundo termo da Equação 2 não for adequado para descrever v_x para o fluxo; no teste 4 alterou-se apenas o valor de ε_2 para 1, pois segundo Steffler e Blackburn (2002), por analogia com os coeficientes de dispersão transversal em rios, valores para ε_2 entre 0,2 a 1,0 são razoáveis.

Posteriormente, comparou-se as profundidades e velocidades simuladas com aquelas medidas nas três seções e calculou-se o erro médio absoluto (EMA) (Chou, Chuang 2011), por meio da Equação 3.

$$EMA = \frac{100\%}{n} \sum \left| \frac{X_{Sim} - X_{Obs}}{X_{Obs}} \right| \quad \text{Equação 3}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta as características do processo iterativo para cada uma das quatro condições testadas.

Tabela 2: Características do processo iterativo da modelagem.

Teste	ε_1	ε_2	ε_3	Tempo Presente	Tempo Final	Passo de tempo	Tempo máximo do passo de tempo	Alteração da solução	Vazão de entrada	Vazão de saída	Nº de passos de tempo
Teste 1	0	0,5	0	50.015	50000	100	100	2,48E-04	0,48	0,47893	507
Teste 2	0	0,5	0,1	50.046	50000	100	100	7,28E-04	0,48	0,47882	507
Teste 3	0,2	0,5	0	0,927	50000	2,08E-06	100	7,53-E02	0,48	0,07181	2770
Teste 4	0	1	0	50.055	50000	100	100	5,65E-09	0,48	0,47827	507

Para os quatro testes realizados, apenas no teste 3 não houve convergência entre as vazões de entrada e saída, apesar de um tempo de processamento mais de cinco vezes maior que o dos demais testes. Pelos valores do fluxo de saída e do passo de tempo presente, no Teste 3 pode-se identificar que os valores obtidos ficaram muito distantes da convergência.

A Figura 1 apresenta as profundidades simuladas utilizando-se os parâmetros especificados para o teste 1. Observa-se que trata-se de trecho raso, com prevalência de profundidades de até 0,60 m e profundidade máxima igual a 1,47 m.

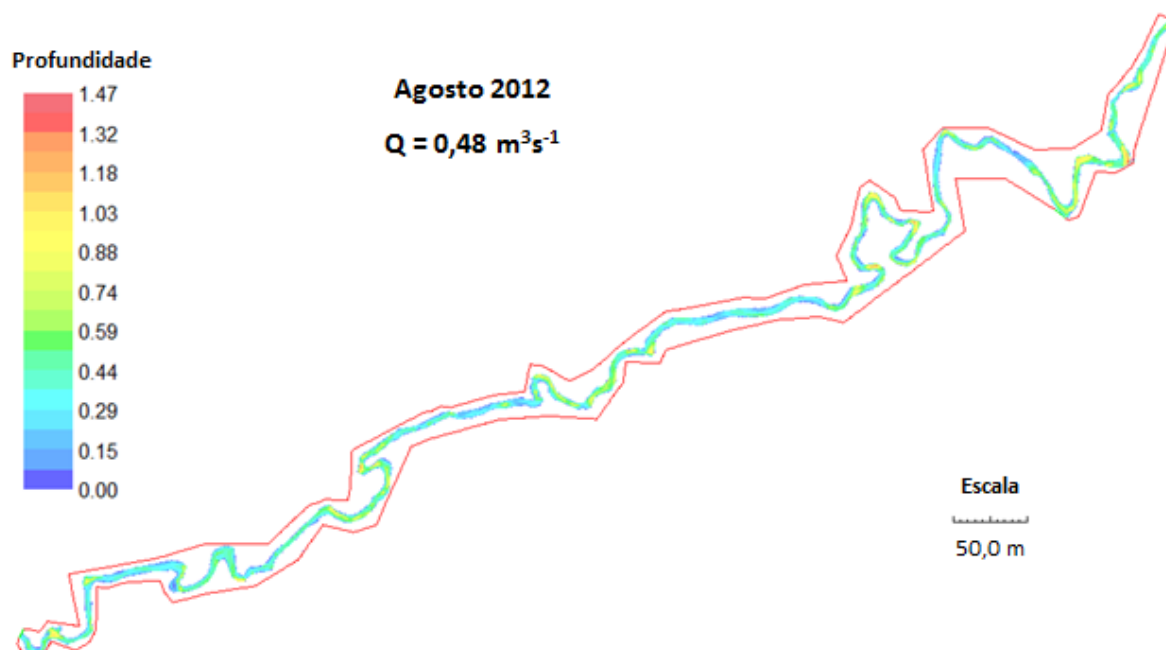


Figura 1: Profundidades simuladas utilizando-se os parâmetros especificados para o teste 1.

Steffler e Blackburn (2002) destacam que a denominada mudança na solução é a alteração global relativa na solução das variáveis sobre o mais recente passo do tempo. O tamanho deste valor relativo regerá a rapidez com que haverá aumento no incremento de tempo, até que o incremento de tempo máximo seja atingido. Neste ponto, a alteração da solução deve diminuir com cada iteração subsequente. Quando esta se torna suficientemente pequena (cerca de $1,0 \text{ E-}05$), a solução pode ser considerada convergente. Apenas o teste 4 atingiu este nível de convergência, apesar dos testes 1 e 2 também terem atingido o tamanho do passo de tempo máximo estabelecido, igual a 100.

Nos testes 1 e 2 a solução atingiu valores relativamente pequenos de mudança na solução (da ordem de $1,0 \text{ E-}04$) e não mais diminuiu, independente do número de intervalos de tempo subsequentes, o que pode indicar uma pequena e persistente oscilação em um (ou às vezes mais) pontos no campo de fluxo. Muitas vezes, a oscilação é associada a um nó superficial que se alterna entre molhado e seco. Outra possibilidade é o desprendimento periódico de vórtices de obstruções. Entretanto, Steffler e Blackburn (2002) admitem alterações da solução da ordem de $1,0 \text{ E-}03$, desde que a variação esteja dentro da precisão desejada, que foi o caso observado.

A Figura 2 apresenta a distribuição das profundidades simuladas e a Figura 3 a distribuição de velocidades nas quatro condições testadas para as seções 1, 2 e 3 respectivamente.

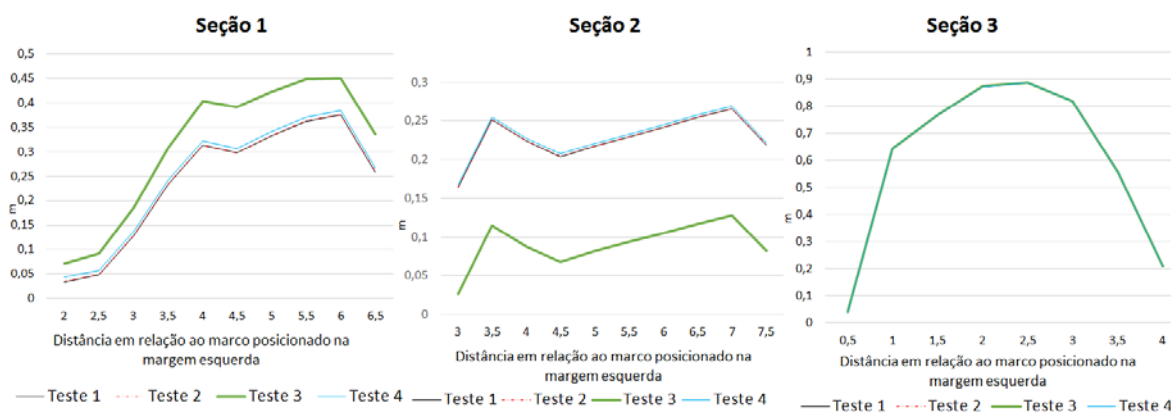


Figura 2: Profundidades simuladas para as três seções transversais de interesse.

Os testes 1 e 2 apresentaram profundidades idênticas para as três seções. O teste 3, não convergente, só apresentou profundidades idênticas às demais hipóteses testadas para a seção 3, provavelmente condicionada às condições de contorno preestabelecidas. Na seção 1 observa-se uma sensível diferença em relação aos valores obtidos com os testes 1, 2 e 4 e o teste 3, mas é na seção 2 que os valores obtidos pelos testes 1, 2 e 4 são realmente discrepantes em relação ao teste 3, o que pode ser explicado pela vazão de saída estar muito aquém da especificada no teste 3. Os testes 1 e 2 apresentaram para as seções 1 e 2 profundidades ligeiramente inferiores àquelas determinadas pelo teste 4, mas sempre muito próximas, e idênticas na seção 3.

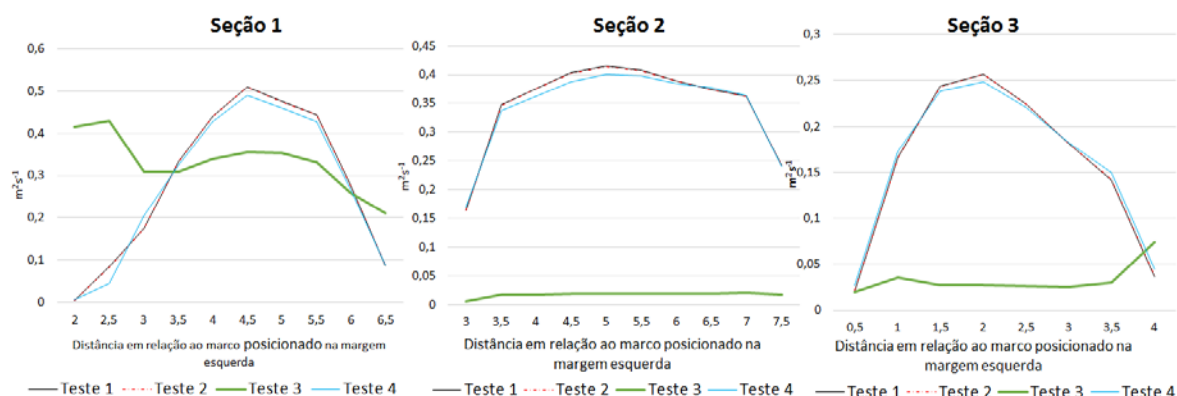


Figura 3: Velocidades simuladas para as três seções transversais de interesse.

Como esperado, o teste 3 apresentou velocidades simuladas bem aquém daquelas obtidas para os demais testes, principalmente nas seções 2 e 3, o que é explicado pela ausência de convergência entre as vazões de entrada e saída.

Também para velocidades, os testes 1 e 2 apresentaram resultados idênticos nas três seções estudadas. Enquanto o teste 4 apresentou velocidades ligeiramente inferiores em alguns pontos das três seções analisadas, compatível com as profundidades, uma vez que estas se apresentaram ligeiramente superiores no teste 4 em relação aos testes 1 e 2.

Apesar do teste 4 apresentar a menor alteração na solução ($5,65E-09$), inferior a $1,0E-05$, os testes 1 e 2 também apresentaram mudanças na solução pequenas, da ordem de $1,0E-04$.

A comparação das profundidades e velocidades simuladas com as medidas nas três seções analisadas e os respectivos erros médios absolutos observados nos quatro testes são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Média das profundidades e velocidades observadas e simuladas nas três seções monitoradas e o erro médio percentual absoluto para os quatro testes.

Seção	Profundidades Observadas	Média das profundidades simuladas (m)			
		Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
S1	0,289	0,261	0,262	0,338	0,270
	Erro médio absoluto	0,096	0,094	0,168	0,066
S2	0,249	0,227	0,227	0,098	0,231
	Erro médio absoluto	0,089	0,088	0,609	0,075
S3	0,660	0,680	0,680	0,680	0,680
	Erro médio absoluto	0,030	0,030	0,031	0,031
Erro Médio absoluto da profundidade		0,072	0,071	0,269	0,057
Seção	Velocidades Observadas	Média das velocidades (m^2s^{-1})			
		Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
S1	0,364	0,314	0,313	0,322	0,304
	Erro médio absoluto	0,136	0,139	0,115	0,165
S2	0,338	0,348	0,348	0,017	0,342
	Erro médio absoluto	0,029	0,027	0,949	0,011
S3	0,153	0,179	0,179	0,035	0,180
	Erro médio absoluto	0,168	0,168	0,771	0,174
Erro Médio absoluto da velocidade		0,111	0,111	0,612	0,116

Na Tabela 3 pode-se observar que os valores de EMA identificados nos testes 1 e 2 são praticamente idênticos e os erros do teste 4 também são pequenos e próximos dos dois anteriores. Contudo, os testes 1 e 2 apresentaram maior EMA em relação às profundidades e o teste 4 apresentou maior EMA em relação às velocidades. Já o teste 3, não convergente, apresentou erros absurdos em relação aos demais.

CONCLUSÕES

O modelo hidrodinâmico River 2D não apresentou sensibilidade aos parâmetros de entrada que compõe o coeficiente de viscosidade turbulenta. Os testes realizados indicam que alterações no parâmetro ε_1 podem refletir diretamente na estabilização do modelo, contudo, ao se adotar ε_1 igual a zero, mesmo alterando-se os coeficientes ε_2 , e ε_3 , o modelo converge para a solução. Isto significa que mesmo no trecho raso estudado, a adoção de ε_1 igual a zero permite adequada estabilização.

Os parâmetros ε_2 e ε_3 não apresentaram sensibilidade nos testes realizados. Entretanto, sugere-se que em trabalhos futuros, análises de sensibilidade à rugosidade, considerem variações nos coeficientes que compõem o coeficiente de viscosidade turbulenta (ε_2 , e ε_3) para avaliar se ao se alterar o coeficiente de rugosidade, esses coeficientes podem contribuir para a estabilização do modelo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG pelo apoio financeiro a execução do projeto (Processo TEC - APQ-02118-12).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHOU, Wen-Chieh and CHUANG, Ming-De, 2011, Habitat evaluation using suitability index and habitat type diversity: a case study involving a shallow forest stream in central Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011. Vol. 172, no. (1-4), p. 689–704.
2. HINZE, Julius Oscar, 1959, *Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory*. McGraw-Hill.
3. STEFFLER, P and BLACKBURN, J, 2002, *River2D. Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat. Introduction to depth averaged modelling and user's manual*. Canada : University of Alberta.