
POTENCIAL HIDRÁULICO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS II: IDENTIFICAÇÃO DE SEÇÕES POTENCIAIS PARA CONSTRUÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE ÁGUA¹

Reynaldo Furtado Faria Filho², João Batista Lopes Silva³, Paulo Afonso Ferreira⁴,
Humberto Paulo Euclides⁵, Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro⁶

RESUMO

No presente trabalho, utilizaram-se os Sistemas de Informações Geográficas para desenvolver uma metodologia a fim de identificar seções do curso de água de sub-bacias com potencial para construção de reservatórios, como também, simular um reservatório capaz de atender à demanda de abastecimento de água na cidade de Viçosa – MG, em 2030. O estudo foi desenvolvido na sub-bacia do rio Turvo Sujo, bacia do rio Doce. O modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) foi obtido com dados de altimetria e hidrografia do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Identificaram-se nove seções com estreitamento menor que 100 m. Na simulação do reservatório para atender a demanda de água para Viçosa, em 2030, foram realizadas visitas a campo em quatro seções, corroborando os resultados encontrados com a utilização da metodologia.

Palavras-chaves: barragem, abastecimento de água, usos múltiplos de água

ABSTRACT

HYDRAULIC POTENTIAL OF HYDROGRAPHIC BASINS II: IDENTIFICATION OF POTENTIAL SECTION FOR CONSTRUCTING WATER RESERVOIR

The Geographical Information Systems was used in this study in order to develop a method for the identification of sections in the watercourse of sub-basin with potential for reservoir construction, and to simulate a reservoir able to meet water supply needed for the city of Viçosa, Minas Gerais state, in the year 2030. The study was carried out in the sub-basin of Turvo river, of Doce river basin. The hydrologically consistent digital model (MDEHC) was developed by altimetry data and hydrography obtained from Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Nine sections with less than 100m narrowing were identified. The results from field visit to four sections validated the current simulation methodology for reservoir that could meet water demand of Viçosa in 2030.

Keywords: storage dam, water supply, multiples water uses.

Recebido para publicação em 13/08/2008. Aprovado em 21/08/2009.

1 Texto extraído da dissertação do primeiro autor.

2 MS em Engenharia Agrícola, avreynaldo@yahoo.com.br.

3 MS em Engenharia Agrícola, silvajbl@yahoo.com.br.

4 PhD. em Engenharia de Água e Solo, pafonso@ufv.br.

5 MS em Engenharia Agrícola, hpeuclid@ufv.br.

6 PhD. em Economia e Otimização Florestal, cribeiro@ufv.br.

INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização o homem modifica seu meio ambiente, às vezes, até por uma questão de sobrevivência. Uma das atividades mais antigas promovidas pelo homem, é a armazenagem de água por meio da construção de grandes barragens (FREITAS *et al*, 2003). Segundo Campos (1996), esta atividade consiste de intervenção do homem na natureza, com o objetivo de adaptar os padrões das vazões naturais dos rios aos padrões demandados pela sociedade. Dessa forma, uma barragem atua como uma fonte extra de água, que se adiciona à vazão mínima durante o período de escassez.

Considerando-se a utilização dos reservatórios de acumulação de água com a finalidade de atender seus usos múltiplos, o conhecimento da demanda de água necessária e da capacidade de acumulação do reservatório são informações importantes, tanto para o gerenciamento dos recursos hídricos quanto para elaboração de projetos de reservatórios (ALBUQUERQUE *et al*, 2004). Segundo esses autores, dentre as diversas técnicas existentes na literatura para determinação do volume total armazenado e volume útil de um reservatório, destacam-se os programas computacionais que utilizam imagens de satélites. Entretanto, técnicas de simulação de curvas cota-área e cota-volume são clássicas e bastante utilizadas em engenharia de recursos hídricos, na qual se procuram definir equações matemáticas para estabelecer relações entre as características topográficas da região, a área da superfície do lago e o volume total acumulado.

O advento da tecnologia dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e de algoritmos para análise de modelos digitais do terreno permitiu melhorar, consideravelmente, a descrição dos processos hidrológicos nos modelos (THOMPSON *et al*, 2001; GARBRECHT & MARTZ, 2000; GAREN *et al*, 1999; OLIVERA & MAIDMENT, 1999; VERDIN & JENSON, 1996). Portanto, os SIG tornaram-se uma ferramenta eficiente na análise da representação da variabilidade espacial dos fatores, que interferem tanto na modelagem hidrológica como na qualidade da água (KIM & STEENHUIS, 2001).

Os SIG's se inserem como uma ferramenta capaz de manipular as funções, que representam os processos ambientais em diversas regiões, de uma forma simples e eficiente, possibilitando economia de recursos e tempo (SILVA, 2002). Segundo Savabi *et al* (1995), uma das vantagens mais relevantes da integração dos SIG's com os modelos hidrológicos é permitir a obtenção de mapas temáticos de acordo com o interesse do usuário, possibilitando sua utilização como dados de entrada em modelos hidrológicos.

Diante do exposto, objetivou-se desenvolver uma metodologia para identificar, por meio de SIG, seções potenciais, ao longo de cursos de água, para construção de reservatórios, bem como, simular um reservatório com capacidade de armazenamento para atender à demanda de abastecimento de água para a cidade de Viçosa, MG, em 2030.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da metodologia utilizaram-se o software de SIG ArcGis versão 9.0 e a sub-bacia do rio Turvo Sujo, como área de estudo. O rio Turvo Sujo é afluente do rio Turvo Limpo, localizado nas cabeceiras do rio Doce na Zona da Mata Mineira. Sua área de drenagem é de, aproximadamente, 402 km², tendo como seu principal afluente o ribeirão São Bartolomeu, que corta a cidade de Viçosa, sendo a principal fonte de abastecimento de água para a população da cidade.

Para a obtenção do MDEHC foram utilizadas curvas de nível equidistantes de 20 m e hidrografia, ambas obtidas de cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala 1:50.000.

A determinação do tamanho de célula adequado à geração do MDEHC, fez-se a partir da metodologia apresentada por Hutchinson (2007). Esta propõe a geração de modelos digitais de elevação (MDE) com diferentes tamanhos de célula e a determinação da raiz quadrada média (*RMS*) de suas respectivas declividades (1), plotando-as em gráficos. O tamanho de célula ideal é identificado no gráfico quando a curva do tamanho de célula em função do *RMS* torna-se assintótica. Neste estudo, geraram-se 12 modelos digitais de elevação com os seguintes tamanhos de células: 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 50; 70; 90 e 100 m. Em que, pela metodologia, a curva estabilizou-

se com tamanhos de células de 5, 7,5 e 10 m, sendo utilizada neste trabalho a célula com resolução de 10 m, equivalente à exatidão cartográfica dos dados de entrada na escala 1:50.000.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum s^2} \quad (1)$$

em que

RMS é a raiz quadrada média da declividade (graus);

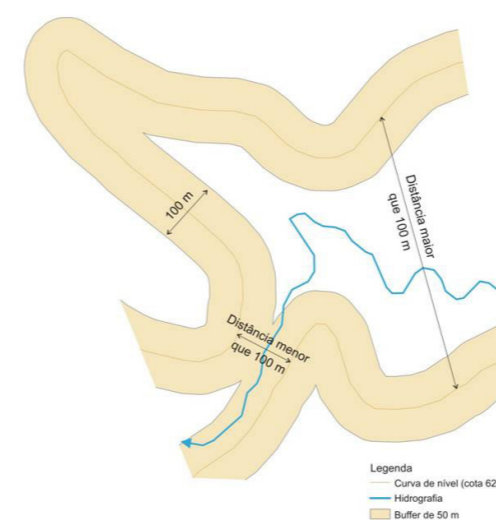
n é o número total de células (adimensional) e;

s é a declividade (graus).

Realizou-se o pós-processamento do MDE gerado, empregando-se a metodologia descrita por Ribeiro *et al*. (2002). Portanto, fez-se o aprofundamento da hidrografia, removendo as depressões espúrias e corrigindo o perfil da hidrografia, tornando o MDE representativo do relevo real, além de garantir que o escoamento superficial fosse convergente para a rede de drenagem mapeada, em consonância com sua consistência hidrográfica. Esses procedimentos objetivaram, em suma, à obtenção do MDEHC.

A seleção dos locais com estreitamento foi realizada, ao longo do curso de água principal da sub-bacia do rio Turvo Sujo. Para isto, fez-se a seleção das curvas de nível que interceptavam o rio Turvo Sujo. Em seguida, geraram-se margens de 50 m nessas curvas. Os locais, onde as margens se uniram, indicavam a existência de um estreitamento menor que 100 m (Figura 1). Esses locais foram selecionados para simular a construção de reservatórios.

Figura 1. Margens de 50m nas curvas de nível



A partir de cada seção transversal com estreitamento, fez-se a simulação da bacia hidrográfica acumulada desta seção, para cotas de 2 à 20 m, com intervalos de 2 m. Para cada seção, nas cotas de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20 m, determinaram-se os espelhos de água das barragens, com suas respectivas áreas e volumes acumulados. De posse dos valores de volume, área e cotas, geraram-se gráficos de cota versus volume e cota versus área. Com esses gráficos, foi possível verificar se a sub-bacia hidrográfica, a montante da seção analisada, é capaz de armazenar o volume necessário à regularização desejada. Foram ajustadas equações, que permitem o cálculo do volume ou área, de acordo com a altura da barragem.

Em cada seção identificada, foi calculado o volume máximo possível de ser regularizado, utilizando-se o Atlas Digital das Águas de Minas (ATLAS, 2005), o qual disponibiliza equações que possibilitam este cálculo. Para a sub-bacia do rio Turvo Sujo, a equação é:

$$V_{reg\ max} = 0,1411 A^{0,9862} \quad (2)$$

em que

V_{reg} = volume de armazenamento necessário à regularização da vazão máxima possível de ser regularizada (hm³);

A = área de drenagem a montante da seção fluvial (km²).

Vale ressaltar que o volume máximo passível de ser regularizado é de 70% da vazão média de longo período. Determinado o volume máximo passível de ser regularizado, verificou-se, quando possível, a cota do reservatório correspondente ao mesmo. É importante destacar que esta metodologia é aplicada em análises individuais, não considerando as captações realizadas a montante do local em estudo.

Visando suprir déficits futuros no abastecimento de água do município de Viçosa, realizou-se a simulação da construção de um reservatório. Segundo a autarquia municipal de saneamento da cidade de Viçosa - MG, Sistema Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), a captação atual de água realizada para abastecimento da cidade de Viçosa e da Universidade Federal de Viçosa (UFV), é de 210 L.s⁻¹. A autarquia prevê, para o ano 2030, uma demanda em torno de 400 L.s⁻¹.

Para estimar o volume necessário à regularização

da vazão, utilizou-se o método apresentado por Tucci (1993), em que: (i) estima-se primeiro a vazão média de longo período da bacia em estudo (Q_{mlp}), em $m^3 \cdot s^{-1}$; (ii) faz-se o cálculo de $m = Q_{reg}/Q_{mlp} \cdot 100$, em que, Q_{reg} é a demanda desejada ($m^3 \cdot s^{-1}$); (iii) com o valor calculado no item anterior, entra-se na tabela da curva regional adimensional (r), ajustada para a região em que se encontra a bacia; e (iv) o volume necessário à regularização da vazão desejada (V), em hm^3 , é $V=0,3154 r Q_{mlp}$.

A metodologia de Tucci (1993) não considera perdas por evaporação. Assim, pode-se considerar a perda por evaporação como uma demanda adicional (me).

$$me = \frac{0,00317 E A_{2/3}}{Q_{mlp}} \quad (3)$$

em que

E = evaporação total média anual (mm) e;

$A_{2/3}$ = área do reservatório para 2/3 de seu volume útil (km^2).

Portanto, a demanda total é obtida pela soma das duas demandas ($m^* = me + m$).

Para estimativa do volume a ser armazenado, empregaram-se as equações da vazão média de longo período (Q_{mlp}), vazão mínima de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e equação da curva regional, ajustadas para a região hidrográfica da bacia do rio Turvo Sujo. Estas

$$Q_{mlp} = 0,0180 A^{0,9862} \quad (4)$$

$$Q_{7,10} = 0,0038 A^{1,0102} \quad (5)$$

$$r = a x^b = 1,4573 \cdot 10^{-8} m^{5,0034} \quad (6)$$

equações foram obtidas com o Atlas (2005) e são descritas a seguir.

É importante ressaltar que à vazão de demanda de $190 L s^{-1}$ ($400 - 210 = 190$) a ser regularizada, prevista pelo SAAE, foi acrescentado o valor da vazão correspondente a 70% da $Q_{7,10}$ a fim de atender à legislação mineira sobre outorga de uso de água superficial, a ser concedida a jusante do barramento. Finalmente, após determinação do volume a ser

regularizado para garantir a demanda, determinou-se a cota do reservatório necessária a seu armazenamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 mostram-se os pontos que representam as seções encontradas ao longo do curso de água principal, com estreitamento menor que 100 m. Ao lado da sub-bacia, é apresentado um detalhamento das seções com estreitamento. Observa-se que nove seções com estreitamento foram identificadas. No detalhamento das seções com estreitamentos, as curvas de nível com cotas superiores àquelas das curvas, que estão próximas à hidrografia, seguem o mesmo padrão destas, demonstrando a tendência do relevo para um estreitamento. Assim, é importante destacar que a metodologia, adotada neste trabalho com vistas a identificar os locais com estreitamento, utiliza somente as curvas de nível, que estão próximas ao curso de água, sendo necessário uma análise visual das demais curvas para a constatação da existência do estreitamento.

A confirmação da existência dos estreitamentos, determinados por meio da metodologia, foi efetuada durante uma visita a campo, nas seções 5, 6, 7 e 8. A localização destas foi obtida com o auxílio de um GPS de navegação, quando se confirmou a veracidade na determinação de seções com estreitamento, pois, em todas as seções visitadas, verificou-se a existência das seções indicadas nas simulações. Na Figura 3, é apresentada uma fotografia da seção 5, demonstrando a existência do estreitamento, determinado por meio da metodologia.

No Quadro 1, apresentam-se os valores da área de drenagem, vazões Q_{mlp} , $Q_{7,10}$ e vazão regularizada máxima para cada seção encontrada. Enquanto que no Quadro 2, encontram-se os valores das áreas de inundação do lago, o volume de acumulação para as cotas da soleira de 2, 10 e 20 m de cada seção e os volumes de regularização máximos para cada seção. Na seção 1, são apresentados os valores de área de inundação e volume de acumulação para a cota de 18 m, demonstrando que seria possível armazenar a vazão máxima possível de ser regularizada (70% da Q_{mlp}) com uma barragem com altura da soleira em torno de 19 m. As demais seções, 2 à 9, indicam que suas bacias de acumulação não permitem o

armazenamento do volume máximo possível de ser regularizado. Isto em razão da região em estudo estar inserida em uma bacia de cabeceira e sem áreas de contribuição, que permitam a acumulação

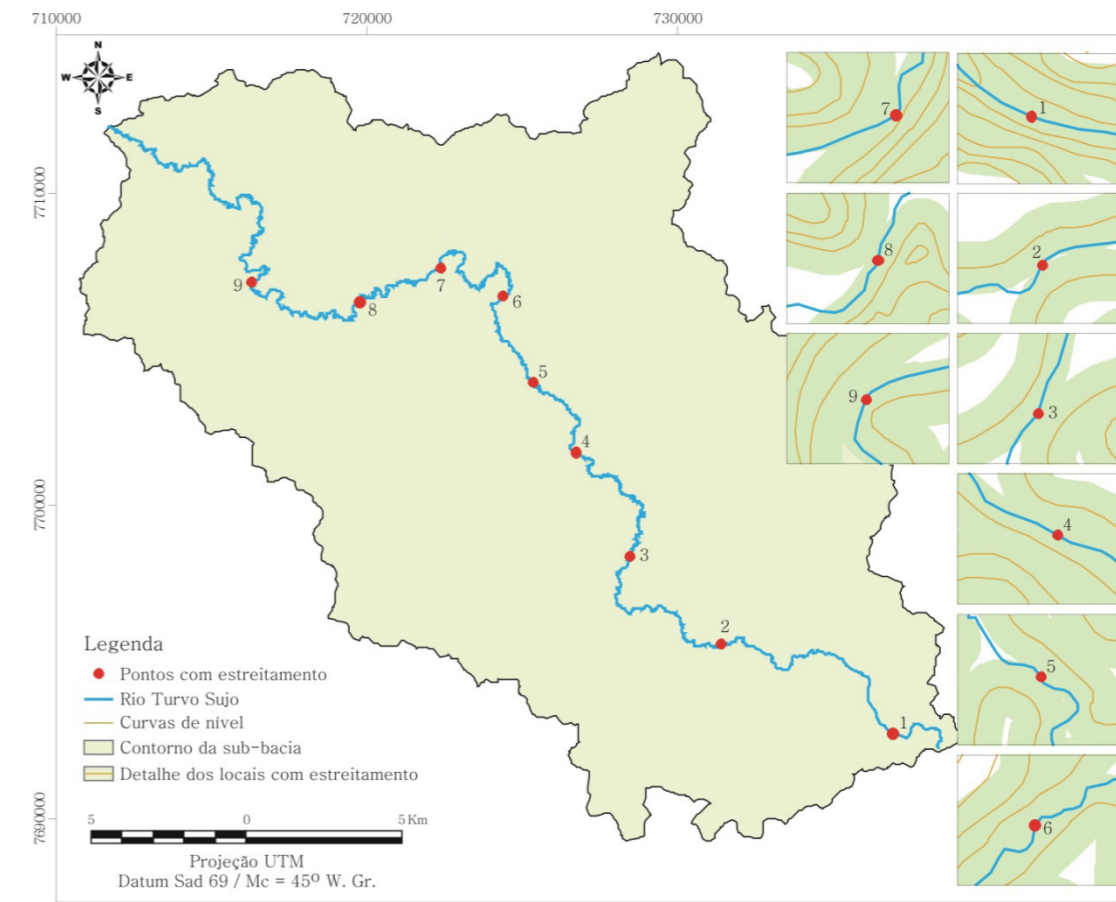


Figura 2. Seções ao longo do curso de água principal com estreitamento menor que 100 m



Figura 3. Vista geral da seção 5

do volume de água possível de ser regularizado com uma barragem de soleira menor que 20 m.

Quadro 1. Área de drenagem (A), vazões Q_{mp} e $Q_{7,10}$ e volumes de regularização máximos ($V_{reg\ max}$) para cada seção com estreitamento.

Seção	A (km ²)	Q_{mp} (m ³ s ⁻¹)	$Q_{7,10}$ (m ³ s ⁻¹)	70% $Q_{7,10}$ (m ³ s ⁻¹)	$Q_{reg\ max}$ (m ³ s ⁻¹)	$V_{reg\ max}$ (m ³)
1	2,4099	0,0429	0,0092	0,0065	0,0300	335.934
2	35,6357	0,6106	0,1404	0,0983	0,4274	4.786.260
3	90,3800	1,5288	0,3596	0,2517	1,0702	11.984.103
4	120,3950	2,0285	0,4804	0,3363	1,4199	15.900.949
5	168,2090	2,8210	0,6735	0,4714	1,9747	22.113.603
6	192,5390	3,2230	0,7720	0,5404	2,2561	25.265.003
7	257,9740	4,3010	1,0374	0,7262	3,0107	33.715.003
8	265,1560	4,4191	1,0666	0,7466	3,0933	34.640.500
9	342,4510	5,6871	1,3811	0,9668	3,9810	44.580.814

Na Figura 4 apresentam-se, para cada seção identificada, os gráficos contendo cota versus área e cota versus volume. São também apresentadas as equações, que permitem calcular a área de inundação e o volume para determinada cota.

Nas equações geradas, o menor coeficiente de determinação (R^2) foi 0,9584, demonstrando que as curvas apresentaram bom ajuste, podendo ser utilizadas na estimativa de áreas e volumes com aproximação aceitável.

Quadro 2. Área inundada pelo lago da barragem, volume de acumulação de acordo com a cota da soleira e volume de regularização máximo de cada seção.

Seção	Cota (m)	Área Lago (m ²)	Volume (m ³)	Vregmax (m ³)
1	2	1.400	1.423	335.934
	10	13.500	45.800	
	18	53.500	301.655	
	20	67.600	422.956	
2	2	7.100	5.065	4.786.260
	20	641.700	3.933.780	
3	2	6.700	5.113	11.984.103
	20	695.100	4.220.460	
4	2	10.400	12.962	15.900.949
	20	679.300	4.254.920	
5	2	16.900	11.833	22.113.603
	20	1.171.400	7.333.980	
6	2	18.100	21.806	25.265.004
	20	1.406.200	8.292.290	
7	2	16.600	27.260	33.715.003
	20	430.400	3.128.800	
8	2	63.300	118.014	34.640.500
	20	1.230.800	10.159.200	
9	2	12.700	20.785	44.580.814
	20	1.414.400	8.474.290	

As seções com estreitamento, 1 e 2, não foram consideradas por que estão muito próximas à cabeceira do rio Turvo Sujo e distante da ETA II. Na Figura 5, são apresentadas as seções identificadas de

3 a 9 e as estações de tratamento de água (ETA I e II) da cidade de Viçosa. O local de captação de água da ETA I encontra-se numa barragem, no córrego São Bartolomeu e a ETA II no rio Turvo Sujo.

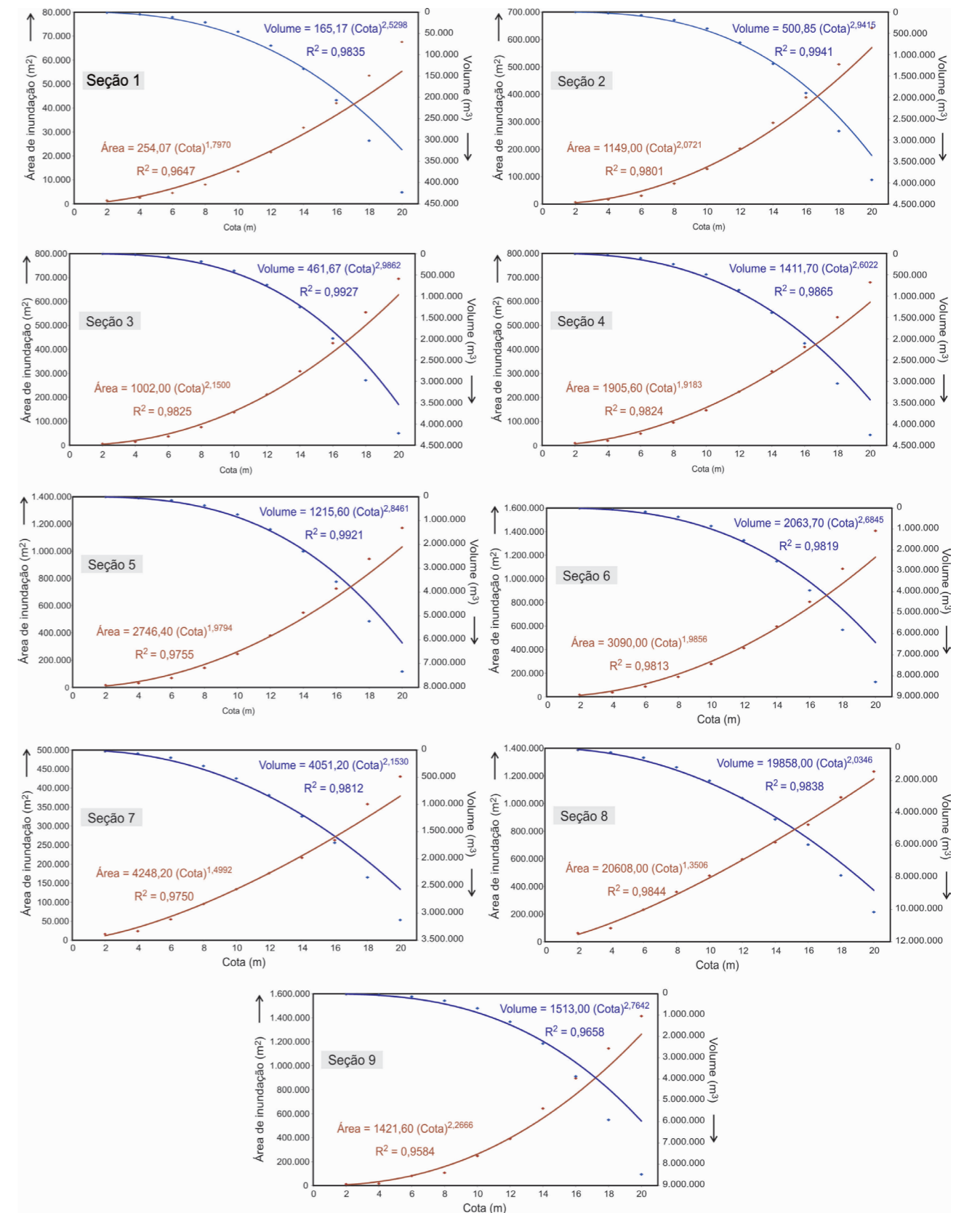


Figura 4. Cota versus área de inundação e cota versus volume de acumulação, para as nove seções identificadas.

No Quadro 3, são apresentados os valores de cota, volume e área de inundação de cada seção, com estreitamento, selecionada para atender a demanda de água da cidade de Viçosa, em 2030.

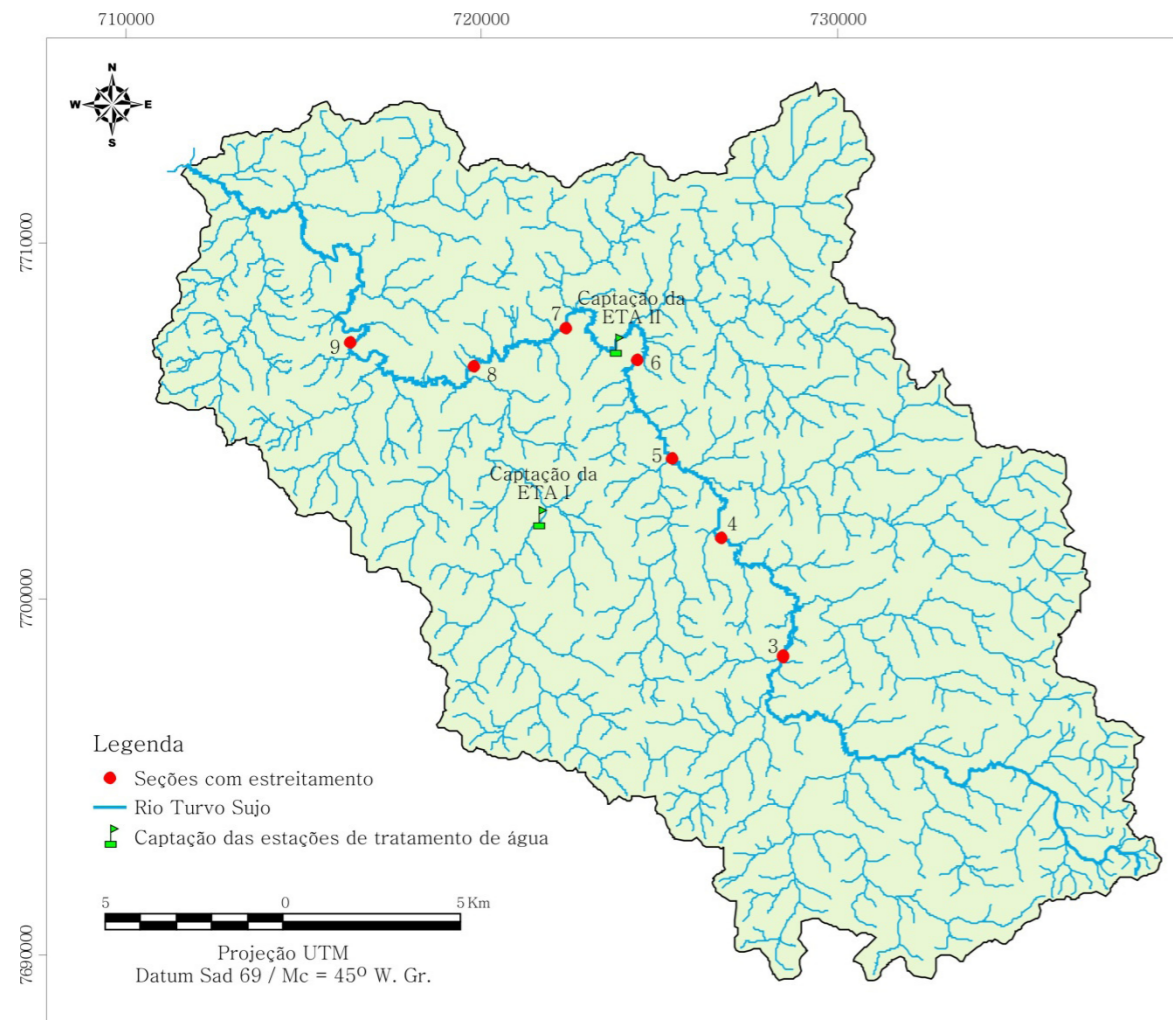


Figura 5. Seções com estreitamento 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 e estações de tratamento de água (ETA I e II) do município de Viçosa.

Quadro 3. Dados de entrada e parâmetros utilizados no cálculo da simulação do reservatório.

Seção	Volume (m ³)	Cota (m)	Área (m ²)
3	146.467	6,88	63.362
4	112.478	5,38	48.046
5	94.198	4,61	56.584
6	90.487	4,09	50.632
7	88.195	4,18	36.291
8	88.663	2,09	55.640
9	92.472	4,43	41.439

Considerando-se a localização da barragem em relação à população a ser atendida (menor custo de distribuição de água), as opções mais indicadas são as seções 5 a 8. A seção 9 não é recomendada, pois

recebe a descarga do ribeirão São Bartolomeu (esgoto da cidade). A seção 8 parece ser a que apresenta menor custo/benefício, pois, apresenta custos menores (menor altura da barragem) e melhor localização em relação à população a ser atendida. Entretanto, devido a vários fatores não contemplados neste estudo, como custo de distribuição de água, vazões já outorgadas a montante das seções de interesse, qualidade de água, efluentes industriais, domésticos e agrícolas, e outros, recomendam-se estudos nas seções de 5 a 8 a fim de selecionar aquela que apresenta menor custo/benefício e atenda aos aspectos ambientais.

Neste trabalho, os resultados indicam a possibilidade de fornecimento de água para o abastecimento de Viçosa, no ano 2030, com a construção de barragens. É importante destacar que os resultados apresentados são, apenas, para efeito de prospecção, sendo que a

construção ou não da barragem dependerá, ainda, de outros estudos. Todavia, o presente estudo serve para tranquilizar a população de Viçosa, quanto ao abastecimento de água, nas próximas décadas, desde que se construam barragens de regularização na sub-bacia do rio Turvo.

CONCLUSÕES

- A metodologia proposta permitiu identificar nove locais adequados à construção de barragens, com relação à vazão máxima possível de ser regularizada, altura da barragem, bem como, a bacia hidráulica de armazenamento; e
- O estudo de caso, visando à simulação de um reservatório para atender a demanda de abastecimento de água para Viçosa em 2030, identificou, no rio Turvo Sujo, sete seções fluviais potenciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. S. O.; LACERDA JÚNIOR, H. B.; AZEVEDO, J. R. G.; CAVALCANTI, G. L.; PEREIRA, T. S.; SILVA, F. H. C. Desenvolvimento e aplicação de um software para cálculo das relações cota x área x volume de reservatórios. VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Anais... São Luiz, MA, 2004.

CAMPOS, N. Dimensionamento de reservatórios. Fortaleza: UFC, 1996.

EUCLYDES, H. P. (org.). Atlas Digital das Águas de Minas. Viçosa: CPT, 2005.

FREITAS, J. C. A.; ARAÚJO, J. C.; MELO, A. M. C.; Otimização da altura de uma barragem de terra homogênea. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais... Curitiba, PR, 2003.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. Digital elevation model issues in water resources modeling. 1-28p. In Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems. MAIDMENT, D., DJOKIC, D. editors. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2000. 216p.

GAREN, D.; WOODWARD, D.; GETER, F. A user's agency's view of hydrology, soil erosion and water quality modelling. Catena, v. 37, p. 277-289, 1999.

HUTCHINSON, M. F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation. Disponível em: <http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/papers/local.html> Acesso em: 5 fev. 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cartas topográficas do mapeamento sistemático: Ervália, São Miguel do Anta, Teixeira, Viçosa e Ponte Nova, escala varia, Projeção Universal Transversa de Mercator, M.C. = 45° W. Gr. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br> Acesso em: 15 jan. 2006.

KIM, S.J.; STEENHUIS, T.S. grid-based variable source area storm runoff model. Transactions of the ASAE. v.44, n.4, p.863-875, 2001.

OLIVERA, F.; MAIDMENT, D.R. GIS-Based Spatially Distributed Model for Runoff Routing, Water Resources Research, v.35, n.4, p.1155-1164, 1999.

RIBEIRO, C. A. A. S.; CHAVES, M. A.; SOARES, V. P.; EUCLYDES, H. P. Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Amazônia Legal. 2º Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste. Anais... Campo Grande, MS, 2002.

SAVABI, M.R.; FLANAGAN, D.C.; HEBEL, B.; ENGEL, B.A. Application of WEPP and GIS-GRASS to a small watershed in Indiana. Journal of Soil and Water Conservation, v. 50, p.477-483, 1995.

SILVA, J. M. A. Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: desenvolvimento e aplicação. Dissertação de Mestrado, Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2002, 137p.

THOMPSON, J.A.; BELL, J.C.; BUTLER, C.A. Digital elevation model resolution: effects on terrain

attribute calculatoin and quantitative soil-landscape modeling. **Geoderma**. v.100, p.67-89, 2001.

TUCCI, E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade. ABRH: Edusp, 1993.

VERDIN, K. L.; JENSON, S. K. **Development of continental scale digital elevation models and extraction of hydrographic features**. International Conference, 3, Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Fé, NM: NCGIA, 1996. (CD-ROM).