

Modelagem do volume de reservatórios de irrigação para fins de outorga e planejamento agrícola

Modeling of the irrigation reservoirs for concession and agricultural projection

Adroaldo Dias Robaina^I Marcia Xavier Peiter^I Ana Rita Costenaro Parizi^{II*}
Fátima Cibele Soares^{II} Ana Carla dos Santos Gomes^{II}

RESUMO

No Estado do Rio Grande do Sul, a utilização crescente de sistemas de irrigação vem tornando cada vez mais importante a reservação de água através de barragens. Neste caso, é essencial a determinação do volume de água disponível nessas estruturas para o adequado planejamento dos sistemas irrigados e outorga para o uso da água. Atualmente, a determinação do volume é pouco frequente porque o método direto (batimetria) caracteriza-se por ser oneroso, além de exigir mão-de-obra especializada e tempo disponível. Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar um modelo matemático para a determinação do volume de água armazenado em reservatórios de irrigação. O modelo matemático escolhido foi representado pela fórmula de Schoklisch, em que o volume de água de um reservatório é dado pelo produto da área e profundidade máxima em nível normal e o parâmetro de Schoklisch (η). Foi feita a análise do parâmetro η a partir dos dados fornecidos por 210 reservatórios com finalidade de irrigação, localizados na região da Campanha do Estado do Rio Grande do Sul. Através dos resultados, pode-se observar que o valor do coeficiente de Schoklisch (η) variou entre 0,47 e 0,53, apresentando um valor médio de 0,50 e desvio padrão de 0,05, considerando-se os municípios em conjunto. Observou-se, ainda, que todos os locais estudados enquadraram-se na classe de desempenho ótimo. Os coeficientes de determinação encontrados para as regiões de estudo foram superiores a 0,99. A relação entre o volume estimado e o volume observado em reservatórios demonstra o alto grau de correlação entre os valores testados e permite a recomendação do uso do modelo de Schoklisch para a determinação do volume de água armazenado em reservatórios de irrigação nas localidades em estudo.

Palavras-chave: volumetria, hidrometria, batimetria.

ABSTRACT

In the Rio Grande do Sul state, the irrigation systems for growing use contributes to make the water reserves through barrages more important. In this case, it is essential to determine the volume of water available in these structures for the appropriate projection of the irrigated systems and concessions for water usage. Currently, the determination of the volume is not much frequent because the direct method (bathymetry) is characterizes as onerous and besides demands specialized workforce and available time. Thus, this research had the objective to evaluate a mathematical model to determine the volume of water stored in irrigation reservoirs. The mathematical model chose was represented by Schoklisch formula, where the volume of water of a reservoir is given by the product of the area and the maximum depth in normal level and the Schoklisch parameter (ζ). The analysis of the parameter ζ was based on the data provided by 210 reservoirs destined to irrigation, located in the Campanha of Rio Grande do Sul state. Through the results it is possible to notice that the Schoklisch (ζ) coefficient value varied between 0.47 and 0.53, presenting a average value of 0.50 and standard deviation of 0.05 considering the localities altogether. It was also observed, that all localities studied fitted in the class of optimum performance. The coefficients of determination found for the studied regions were superior to 0.99. The relation between the expected volume and the observed volume in reservoirs demonstrates the high degree of correlation between the tested values and allows the recommendation of the Schoklisch model for the determination of the volume of water stored in irrigation reservoirs in the localities studied.

Key words: volumetry, hydrometry, bathymetry.

^IDepartamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil.

^{II}Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: anaparizi@gmail.com.

*Autor para correspondência.

INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada vem adquirindo importância no Brasil, tanto em termos de área cultivada, como em termos de volume de produção, e as culturas irrigadas alcançam produtividade e, muitas vezes, qualidade superiores às obtidas sem irrigação. DILDA et al. (2008) comentam que, no Brasil, somente 6,19% dos 38,3 milhões de hectares cultivados são irrigados, sendo que esta parcela contribui com 35% da produção agrícola.

No Estado do Rio Grande do Sul, a irrigação suplementar é uma alternativa que vem a garantir a produção em anos com estiagens, quando as perdas de safra são comuns (PEITER, 1998). De acordo com RIO GRANDE DO SUL (2008), a primeira grande perda de grãos do Estado ocorreu na safra de 1985/86, quando os agricultores foram impedidos de colher 2,6 milhões de toneladas. Desde então, o Estado enfrentou nove secas, que representam perdas de 34,8 milhões de toneladas. Esse cenário demonstra a importância da irrigação para a manutenção de cadeias produtivas e do agronegócio.

Para a implantação de um sistema irrigado, deve-se considerar como parte do empreendimento: reservatório, captação, adução e distribuição de água, drenagem, caminhos internos e lavoura propriamente dita. Desses elementos componentes, o reservatório é sem dúvida a obra hidráulica de maior vida útil e sua importância reside na viabilização do processo de irrigação durante o período de safra, quando a água necessária para seu consumo é restrita nos mananciais naturais superficiais. Além disso, por se tratarem de obras que interferem de forma expressiva sobre o meio ambiente, a construção de estruturas hidráulicas de contenção são empreendimentos sujeitos a licenciamento ambiental e outorga do uso da água, em que a determinação do volume é imprescindível.

A avaliação das características de um reservatório deve levar em consideração a identificação de seus níveis característicos (mínimo, normal, máximo e de coroamento) e a estimativa dos volumes armazenado e útil. A medida *in loco* dos volumes de água de reservatórios através de batimetria é um procedimento oneroso e trabalhoso (KRUG & NOERNBERG, 2005), sendo inviável, em muitos casos, pela falta de disponibilidade de mão-de-obra qualificada, materiais e recursos financeiros. Sendo assim, a estimativa através de modelos matemáticos é uma alternativa econômica que pode oferecer subsídios qualificados em pouco tempo.

Ao desenvolverem um modelo de estimativa para capacidade de pequenos reservatórios em Ghana,

LIEBE et al. (2005) confirmam alta precisão na relação funcional utilizada entre o volume dos reservatórios e sua área superficial para a região de estudo. Esses autores citam que tais modelos, depois de ajustados, combinados com análises de imagens de satélite, permitem a construção de um sistema de monitoramento da disponibilidade hídrica de um local com baixo custo.

Em estudos realizados por GEORGIEV (1990) em rios do Estado de Sófia, Bulgária, determinou-se a aplicabilidade e a confiabilidade de alguns modelos matemáticos na estimativa do volume de água. O autor utilizou seis modelos, tais como: equação de Levi (KARASHEV, 1977), equação de Eglassaroff (KARASHEV, 1977), equação de Schamov (KARASHEV, 1977), equação de SCHOKLITSCH (1968), equação de Meyer-Peter & Muller (GRAF, 1971) e equação de SMART (1984). A conclusão obtida com a pesquisa foi que os modelos de Schamov e Schoklitsch apresentaram a melhor precisão para estimar o volume de água.

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar a confiabilidade do modelo matemático de Schoklitsch na estimativa do volume de água em reservatórios de irrigação.

MATERIAL E MÉTODOS

Realizou-se este trabalho, com o intuito de orientar nos processos de outorga de direito de uso de recursos hídricos para fins de irrigação. Foram utilizados 210 reservatórios, localizados na região da Campanha do Estado do Rio Grande do Sul (88 em Alegrete, 46 em Itaqui, 24 em Quaraí e 52 em Uruguaina). De acordo com FEE/SUDESUL (1980), esses municípios são responsáveis pela maior produção orizícola do Estado do Rio Grande do Sul.

O volume em relação à altura de água no reservatório, segundo MOLLE & CADIER (1992), pode ser expresso em forma de tabelas, gráficos, ou representado por uma função do tipo: $V = aH^b$, na qual H (m) é a altura do nível normal da água no reservatório, V (m^3) é o volume de água do reservatório correspondente à altura H e as constantes "a" e "b" são denominados respectivamente de coeficiente de abertura e coeficiente de forma do reservatório. A área S (m^2) do espelho d'água do reservatório, em nível normal, pode ser determinada por: $S = abH^{b-1}$, obtida pela derivação do volume V em relação à altura H na equação (1).

O modelo matemático para a estimativa do volume de reservatórios foi representado pela fórmula de SCHOKLITSCH (1968), resultado da divisão da equação (1) pela equação (2): $V = \eta SH$, na qual V é o

volume de água (m^3), S a área do reservatório em nível normal (m^2), H a profundidade máxima do reservatório em nível normal e η o parâmetro de Schoklisch, que equivale ao inverso do parâmetro de forma, isto é, $\eta=1/b$. No Rio Grande do Sul, a expressão de Schoklisch, com o valor de $\eta=4/9$, ficou conhecida entre os técnicos como fórmula do IRGA (Instituto Rio Grandense do Arroz). Neste trabalho, a análise do parâmetro η foi realizada a partir dos dados fornecidos pelos 210 reservatórios, citados acima.

Os dados correspondentes às variáveis envolvidas na equação (3) permitiram que fosse determinada a variação do parâmetro η nos municípios estudados. Esses dados constam em FEE/SUDESUL (1980) e se referem aos valores de volume armazenado V (m^3), à área alagada em nível normal S (m^2) e à altura da barragem H_b (m). Uma vez que era necessário conhecer a altura da água em nível normal H , sua determinação foi feita através da expressão: $H = H_b - OS$, onde OS é a orla de segurança (m).

A orla de segurança OS (m), que corresponde à diferença entre o nível da crista e o nível normal da água, pode ser determinada pela expressão: $OS = BL + H_s$, em que BL é a borda livre (m) e H_s a sobrelevação ou lâmina de sangria (m), que, neste trabalho, foi admitida como igual a 0,30m (valor médio). A borda livre BL (m), que corresponde à diferença entre o nível da crista e o nível máximo da água, segundo ROBAINA (2008), pode ser determinada pela expressão: $BL = 0,92 + 0,23F^{0,67}$, em que F (km) é o comprimento longitudinal máximo da bacia hidráulica, medido perpendicularmente ao eixo da barragem. Este último

foi determinado por: $R = \frac{L}{S}$, em que S é a área do

reservatório (m^2) e R é a relação entre o comprimento longitudinal (m) e a largura do reservatório (m), o qual, neste trabalho, foi admitido como igual a 2 (valor médio).

Foi feita a análise de regressão linear entre os valores dos volumes estimados pelo método de Schoklisch (X) e os valores dos volumes observados (Y) nos diferentes reservatórios de cada localidade. O coeficiente de correlação (r) permite quantificar o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise (SCHNEIDER, 1998), sendo seu campo de variação de -1 a 1, e, quanto maior o seu valor absoluto, maior o grau de associação entre os valores observados e os valores estimados.

O coeficiente de correlação r pode ser

$$\text{estimado por } r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2][\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]}}$$

, em que, E_i são os valores estimados, O_i os valores observados, \bar{E} a média dos valores estimados e \bar{O} a média dos valores observados. Os valores do coeficiente de correlação encontrados foram classificados, segundo a metodologia de HOPKINS (2000), como é apresentado na tabela 1.

O índice de concordância (c) fornece o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas, uma vez que está relacionada à diferença entre os valores estimados em relação aos valores observados, sendo seu campo de variação de 0 (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita) (WILLMONT, 1981). O índice de concordância c pode ser calculado pela

expressão: $c = \frac{E_i - O_i}{E_i + O_i}$, em que,

E_i são os valores estimados, O_i os valores observados, \bar{E} a média dos valores estimados e \bar{O} a média dos valores observados.

Conhecendo-se esses indicadores, foi determinado o índice de desempenho d , segundo CAMARGO & SENTELHAS (1997), o qual pode ser calculado por: $d = r \cdot c$. O índice “ d ” tem a finalidade de

Tabela 1 - Classes de avaliação de desempenho em função dos valores do coeficiente de correlação “ r ” e do índice de desempenho “ d ”.

Classes	Valores de r^*	Classe de desempenho
1	0,0 – 0,1	Muito Baixa
2	0,1 – 0,3	Baixa
3	0,3 – 0,5	Moderada
4	0,5 – 0,7	Alta
5	0,7 – 0,9	Muito alta
6	0,9 – 1,0	Quase perfeita
Valores de d^{**}		
1	> 0,85	Ótimo
2	0,76 a 0,85	Muito Bom
3	0,66 a 0,75	Bom
4	0,61 a 0,65	Regular
5	0,51 a 0,60	Fraco
6	0,41 a 0,50	Muito Fraco
7	< 0,41	Péssimo

avaliar o desempenho do método proposto, considerando as classes de interpretação (Tabela 1), de acordo com COSTA (2004).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 apresenta os valores médios de volume de água, área alagada, altura da barragem, orla de segurança, altura do nível normal e coeficiente de Schoklisch dos reservatórios e de seus respectivos desvios-padrão. O valor do coeficiente de forma de Schoklisch (η) variou entre 0,47 (Quarai) e 0,53 (Itaqui) e apresentou um valor médio de 0,50 e desvio-padrão de 0,05, considerando-se os quatro municípios em conjunto. Esse resultado mostra a pequena variação do fator de forma η , o que pode ser verificado pelo coeficiente de variação de 5% entre os valores obtidos nas quatro localidades.

Os valores dos coeficientes da análise de regressão entre os volumes estimados e os volumes observados, do coeficiente de determinação², do índice de concordância “c”, do índice de desempenho “d” e da classe de desempenho para as quatro localidades analisadas neste trabalho são apresentados na tabela 3.

Pela avaliação realizada, observa-se que todos os locais estudados enquadram-se na classe de desempenho ótimo, na qual os valores dos coeficientes correspondentes ao produto da correlação e a concordância são maiores que 0,85. Este resultado, aliado aos valores de coeficiente de determinação da regressão, indicam a possibilidade de uso do modelo para estimativa do volume de reservatórios existentes nestas localidades, pois, através do coeficiente de determinação, obtém-se uma estimativa da qualidade do ajustamento dos dados à equação. Em trabalho versando sobre o mesmo tema, LIEBE et al. (2005) desenvolveram um modelo matemático simples que permite a estimativa do volume de água armazenada em reservatórios, em função de sua superfície, através

de imagens de satélites. Esses autores encontraram um coeficiente de determinação de 0,88 entre a estimativa do volume em campo obtida através de batimetria e a obtida através de imagens de satélite.

A figura 1 apresenta a relação entre o volume estimado e o volume observado para as quatro regiões estudadas. Nos gráficos, observa-se que, quanto ao ajuste pelas equações de regressões lineares, todas as localidades apresentaram boa correlação, com valores de r^2 superiores a 0,99, o que significa que há uma correlação quase perfeita entre as duas variáveis analisadas. Segundo GARCIA (1989), valores de coeficiente de determinação superiores a 0,70 indicam bons ajustes, ou seja, com este resultado, pode-se usar o modelo matemático proposto para estimar volume de água de reservatórios.

A relação entre o volume estimado e o volume observado em reservatórios demonstra o alto grau de correlação entre os valores testados e permite a recomendação do uso do modelo matemático de Schoklisch para a determinação do volume de água armazenado em reservatórios de irrigação para fins de outorga e planejamento agrícola. Considerando-se trabalhos anteriores, pode-se afirmar que esta recomendação está de acordo com GEORGIEV (1990), que, entre vários modelos testados, observou o melhor desempenho, na estimativa do volume de água, para o método de Schoklisch. Do mesmo modo, BATHURST et al. (1987) recomendaram o modelo de Schoklisch depois de testar seis modelos matemáticos para estimativa do volume de água (Ackers & White, Meyer-Peter & Mueller, Smart, Mizuyama, Bagnold e Schoklitsch), por oferecer a melhor precisão.

A metodologia desenvolvida nesta pesquisa apresentou resultados promissores, sendo proposta como mais uma ferramenta a ser explorada para subsidiar

Tabela 2 – Valores médios e desvios-padrão dos parâmetros dos reservatórios em quatro municípios do RS.

Local	V 10 ³ m ³	S 10 ⁴ m ²	Hb m	OS m	H m	η
Alegrete	3965,1 (4712)	125,3 (106)	7,6 (2,2) (0,40)	1,5 (0,1)	6,0 (2,2)	0,50 (0,04)
Itaqui	5840,2 (4983)	215,9 (165)	6,9 (1,9)	1,6 (0,1)	5,1 (1,9)	0,53 (0,07)
Quarai	3287,5 (1988)	88,1 (44)	9,2 (1,8)	1,5 (0,1)	7,7 (1,8)	0,47 (0,01)
Uruguaiana	4622,5 (2865)	168,2 (98)	7,3 (1,8)	1,6 (0,1)	5,7 (1,8)	0,49 (0,03)
Todos	4461,2 (4002)	151,5 (110)	7,6 (2,0)	1,6 (0,1)	5,9 (2,0)	0,50 (0,05)

Tabela 3 - Valores dos coeficientes da análise de regressão entre os volumes estimados e os volumes observados, do coeficiente de determinação r^2 , do índice de concordância "c", do índice de desempenho "d" e da classe de desempenho.

Local	a	b	r^2	c	d	Classe
Alegrete	-0,0841	1,0097	0,9945	0,9986	0,9958	Ótimo
Itaqui	0,4308	0,8667	0,9871	0,9260	0,9200	Ótimo
Quaraí	0,0167	0,9889	0,9993	0,9998	0,9995	Ótimo
Uruguaiana	0,0262	0,9841	0,9923	0,9979	0,9930	Ótimo
Todos	0,0632	0,9684	0,9900	0,9971	0,9921	Ótimo

o gerenciamento dos reservatórios para fins de planejamento de áreas irrigadas e outorga do uso da água.

CONCLUSÕES

O modelo matemático de Schoklisch pode ser utilizado na orientação dos processos de outorga e

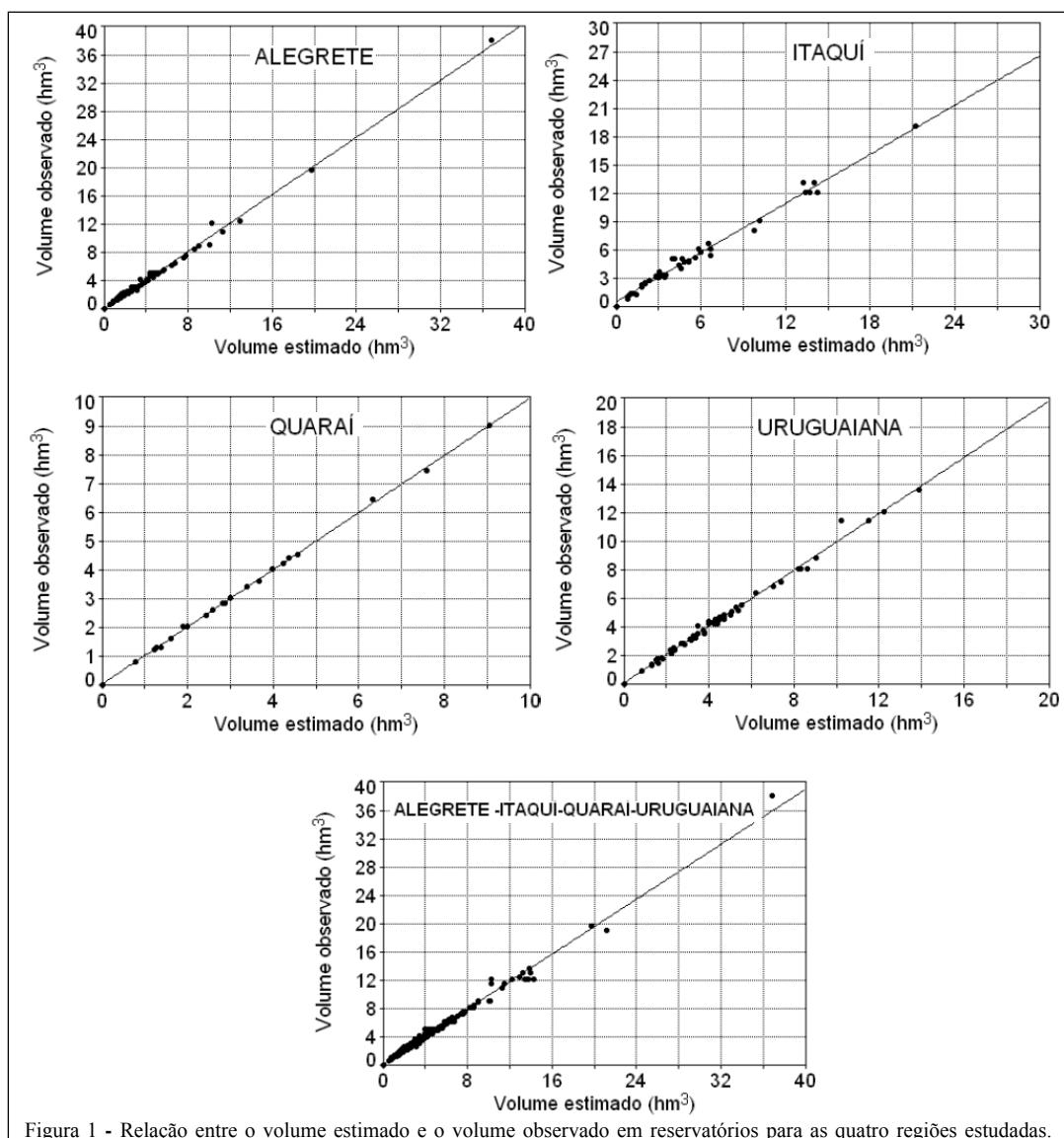


Figura 1 - Relação entre o volume estimado e o volume observado em reservatórios para as quatro regiões estudadas.

planejamento agrícola nas quatro localidades estudadas, sendo uma alternativa econômica que pode oferecer subsídios qualificados em pouco tempo.

REFERÊNCIAS

- BATHURST, J.C. et al. Load discharge equations for steep mountain rivers. In: THORNE, C.R. et al. **Sediment transport in Gravel-Bed Rivers**. New York: John Wiley and Sons, 1987. p.453-491.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997. Disponível em: <<http://www.sbagro.org.br/rbagro/pdfs/artigo129.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2009.
- COSTA, S.V. **Desenvolvimento e calibração de um mini-tanque evaporimétrico**. 2004. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, RS.
- DILDA, C. et al. **Licenciamento ambiental de irrigantes**. COAJU – Comitê do Alto Uruguai, Passo Fundo, 28 jul. 2008. Acessado em 28 jul. 2008. Online. Disponível em: <http://www.upf.br/coaju/download>.
- FEE/SUDESUL. **Plano diretor de irrigação do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Portal do Sul Digital, 2008. 198p.
- GARCIA, C.H. **Tabelas para classificação do coeficiente de variação**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1989. 12p. (Circular técnica, 171).
- GEORGIEV, B.V. Reliability of bed load measurements in mountain Rivers. **Hydrology in Mountainous Regions**, v.2, n.193, p.263-270, 1990. Disponível em: <http://www.cig.ensmp.fr/~iahs/redbooks/a193/iahs_193_0263.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2009.
- GRAF, W.H. **Hydraulics of sediment transport**. New York: McGraw-Hill, 1971. 513p.
- HOPKINS, W.G. **Correlation coefficient**. 2000. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso: 21 jul. 2008.
- KRUG, L.A.; NOERNBERG, M.A. Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná – Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, GO. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. V.1, p.3077-3084.
- KARAUSHEV, A.V. **Theory and methods for river sediments computation**. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 272p.
- LIEBE, J. et al. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment. A case study in the Upper East Region of Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.30, n.6-7, p.448-454, 2005.
- MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do pequeno açude**. Recife: SUDENE-DPG-PRN-DPP-APR, 1992. 523p.
- PEITER, M.X. **Estudo do manejo de irrigação via modelo de simulação**. 1998. 183f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, SP.
- RIO GRANDE DO SUL. **Agência de notícias do Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 27 jan. Acessado em 27 jan 2009. Online. Disponível em: <<http://www.estado.rs.gov.br>>.
- ROBAINA, A.D. **Hidráulica agrícola**. Santa Maria: Departamento de Engenharia Rural, 2008. 96p. (Apostila, 96).
- SCHNEIDER, P.R. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF, 1998. 236p.
- SCHOKLISCH, A. **Construcciones hidráulicas**. Barcelona: Guistavo Gili, 1968. 750p.
- SMART, G.M. Sediment transport formula for steep channels. **Proc Journal of Hydrology**, v.110 n.3, p.267-276, 1984. Disponível em: <<http://mdl.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=ENV&recid=8403919>>. Acesso em: 20 jan. 2009.
- WILLMONT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, n.2., p.184-194, 1981.