

AValiação DO ASSOREAMENTO D E RESERVATÓRIOS NAS BACIAS DO RIO DAS VELHAS, DO RIO PARACATÚ E DO RIO URUCUIA.

João Batista Dias de Paiva¹ & Fábio Alex Beling²

RESUMO --- Este trabalho apresenta a metodologia utilizada para avaliar a produção de sedimentos e o assoreamento dos reservatórios previstos nos “Estudos de Avaliação da Viabilidade Sócio-Econômica e Ambiental de Implantação de um Sistema de Barragens de Regularização de Vazões das Bacias dos Rios das Velhas, Paracatu e Urucuia nos Estados de Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal”, realizados por Lanna et. al (2005). Os resultados mostram que as maiores concentrações médias de sedimentos foram observadas na bacia do Rio das Velhas, onde 4 estações apresentaram produção específica acima da considerada normal pelo PNUD (1977). Na bacia do Rio Urucuia, as duas estações estudadas apresentaram valores abaixo dos considerados normais e na bacia do Rio Paracatu, onde foram estudadas 2 estações, a produção específica observada na estação de jusante está acima da considerada normal, sendo maior ainda considerando somente a área incremental. Na bacia do Rio das Velhas foram detectados trechos onde ocorre produção específica negativa de sedimentos, indicando a ocorrência de deposição, o mesmo não ocorrendo nas bacias dos rios Paracatu e Urucuia.. Na maioria dos reservatórios, o volume assoreado, depois de 100 anos não representou limitação à implantação dos mesmos.

ABSTRACT --- This paper presents the methodology used to evaluate the sediment yield and the sedimentation of the reservoirs previewed in “Evaluating Study of the Economics and Environmental Viability of Discharges Regulation Dam System Implantation in the Rio das Velhas, Rio Paracatu and Rio Urucuia Basins in Minas Gerais, Goiás and Distrito Federal states” accomplished by Lanna et. al (2005). Results permitted concluding that the higher sediment annual mean concentrations were observed at Rio das Velhas basin, where in the 4 studied stations the specific yield of sediments was above the considered normal by PNUD (1977). At Rio Urucuia basin both studied stations presented specific yield below the normal. At Rio Paracatu basin, where 2 stations were studied, the observed specific yield at the downstream station is above the normal, and it is higher considering only the incremental area. Negative specific sediment yield was observed in some sections of the Rio das Velhas basin, indicating deposition in the river sections. On the majority of the reservoirs the predicted values of sediment deposition volume after 100 years did not represent limitation to them implementation.

Palavras-chave: produção de sedimentos, assoreamento de reservatórios, rio São Fransisco.

1) PQ-CNPq, GHIDROS - Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. . Avenida Roraima 1000 - Camobi- Santa Maria – RS 97105-900. Tel.:(55) 3220-8483. E-mail: paiva@ct.ufsm.br .

2) Bolsista PBIC-CNPq, Aluno de Engenharia Civil UFSM. E-mail: fabiobelting@gmail.com.

1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Este trabalho apresenta a metodologia utilizada para avaliar a produção de sedimentos e o assoreamento dos reservatórios previstos nos “Estudos de Avaliação da Viabilidade Sócio-Econômica e Ambiental de Implantação de um Sistema de Barragens de Regularização de Vazões das Bacias dos Rios das Velhas, Paracatu e Urucuia nos Estados de Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal”, realizados por Lanna et. All (2005). Os estudos sedimentológicos foram realizados, com o objetivo de avaliar o assoreamento dos seguintes reservatórios: Alívio, Cedro, Jequitibá, Quartel, Raul Soares Santo Hipólito, na bacia do rio das Velhas; Caatinga, Canabrava, Entre Rios, Escurinho, Paracatu 1, Paracatu 2, Paracatu 3, Prata 1, Prata 2, Preto, Santa Catarina, Santo Antônio, São Pedro, Sono 1, Sono 2 e Verde, na bacia do Rio Paracatu e, Areia, Arinos, Escaramuça, Fetal, Piratinga, Santa Cruz, Urucuia, Urucuia 1 e Urucuia 2, na bacia do Rio Urucuia.

2 - METODOLOGIA

2.1 - Estimativa da produção anual de sedimentos

A estimativa da produção anual de sedimentos, foi feita com base nos dados existentes de concentração de sedimentos em 14 estações da rede de estações fluviométricas operada pela ANA- Agência Nacional de Águas (<http://www.ana.gov.br>) apresentadas na Tabela 1. A Figura 1 apresenta a localização da área em estudo, com as estações utilizadas na análise.

Tabela 1- Estações sedimentométricas utilizadas.

Sub-Bacia	Código	Nome	Curso de Água	Área de Dren. (km2)	Latitude	Longitude
Rio Das Velhas	41199998	Honorio Bicalho- Mon.	Rio das Velhas	1.642	-20° 1' 26' ''	-43° 49' 22' ''
	41200000	Honorio Bicalho	Rio das Velhas	1.642	-20° 1' 0' ''	-43° 49' 0' ''
	41250000	Vespasiano	Rio das Velhas	676	-19° 41' 14' ''	-43° 55' 14' ''
	41340000	Ponte Raul Soares	Rio das Velhas	4.780	-19° 33' 34' ''	-43° 54' 42' ''
	41340005	Ponte Raul Soares-Jus.	Rio das Velhas	4.780	-19° 33' 0' ''	-43° 54' 0' ''
	41410000	Jequitiba	Rio das Velhas	6.292	-19° 13' 52' ''	-44° 1' 29' ''
	41650002	Ponte Do Licinio-Jusa.	Rio das Velhas	10.980	-18° 40' 22' ''	-44° 11' 38' ''
	41780002	Presidente Juscelino-Jus.	Rio Paraúna	3.912	-18° 38' 42' ''	-44° 3' 1' ''
	41818000	Santo Hipolito	Rio das Velhas	16.528	-18° 18' 20' ''	-44° 13' 19' ''
Rio Urucuia	41990000	Varzea da Palma	Rio das Velhas	25.940	-17° 35' 39' ''	-44° 42' 51' ''
	43429998	Arinos-Montante	Rio Urucuia	11.710	-15° 54' 53' ''	-46° 6' 24' ''
Rio Paracatu	43980002	Barra do Escuro (PCD)	Rio Urucuia	24.700	-16° 16' 7' ''	-45° 14' 16' ''
	42395000	Santa Rosa	Rio Paracatu	12.915	-17° 14' 58' ''	-46° 28' 41' ''
	42930000	Porto do Cavalo	Rio Paracatu	36.976	-17° 1' 51' ''	-45° 32' 19' ''

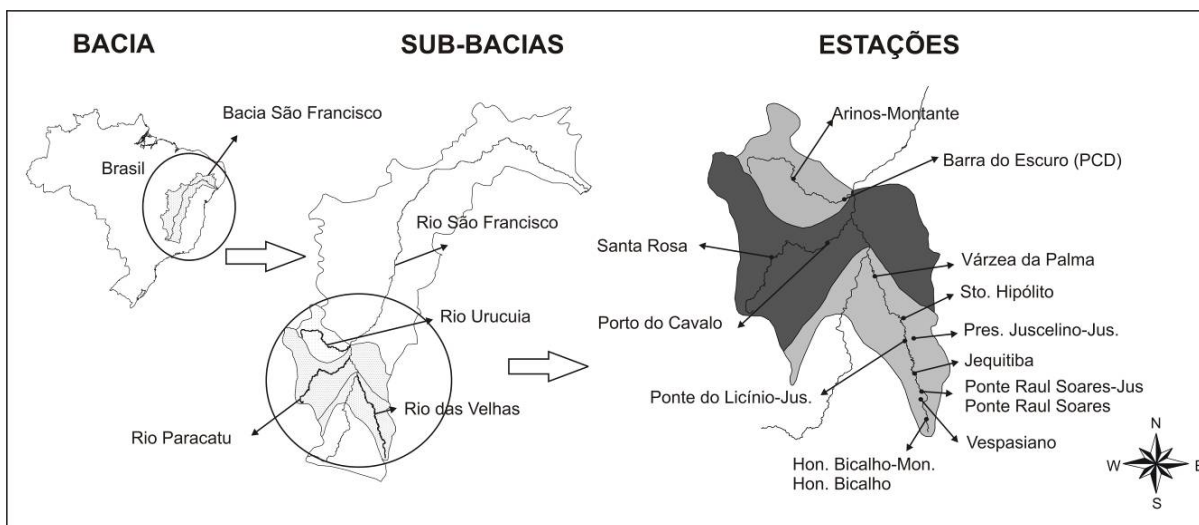


Figura 1 - Localização da área em estudo e das estações utilizadas na análise.

Com base nos dados de concentração de sedimentos disponíveis, de medições esparsas, 4 medições por ano, disponíveis na Home Page da ANA (<http://www.ana.gov.br>), foi calculada a descarga total de sedimentos, correspondente a cada concentração, pelo método de Colby (1957), utilizando-se o TSR1.0 (Software para o Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios), elaborado por Paiva e Lago (1996).

Para a obtenção das curvas chave de sedimentos foi adotado o seguinte procedimento:

Os dados do período anterior a 1977 foram descartados, uma vez que trabalho anterior, realizado por Carvalho (1991), mostra que houve um aumento na produção de sedimentos nas sub-bacias do alto e do médio São Francisco à partir de 1977.

Os dados restantes foram ordenados em ordem crescente de vazões e divididos em 3 séries; uma com os valores médios das descargas sólidas obtidas para cada valor de vazão; uma com os maiores valores obtidos para a descarga sólida correspondente a cada valor de vazão e outra com os menores valores obtidos para a descarga sólida, correspondente a cada valor de vazão líquida, de forma a se obter uma curva média, uma curva média envoltória superior e uma curva média envoltória inferior. Tal procedimento foi necessário uma vez que os dados observados de concentração de sedimentos e em consequência de vazões sólidas, em algumas das estações utilizadas, apresentam grande dispersão, impossibilitando a obtenção de uma curva chave com um ajuste adequado considerando todos os dados. Por essa razão, objetivando diminuir a incerteza da previsão, decidiu-se trabalhar com a envoltória superior dos dados. Na maioria das estações as curvas chave resultantes não são muito diferentes, no entanto em algumas estações há diferenças significativas. Essas diferenças levam à conclusão da necessidade dos órgãos responsáveis pela

base de dados brasileiros promoverem uma análise da consistência na base de dados sedimentométricos.

Uma vez definidas as séries de dados de descargas sólidas, estas foram relacionadas com as descargas líquidas correspondentes, para a obtenção das curvas chave de sedimentos, utilizando-se uma equação do tipo:

$$Q_{st} = a.Q^b \quad (1)$$

Onde:

Q_{st} = descarga sólida total, em t/dia (toneladas por dia)

Q = descarga líquida (m^3/s)

a e b : parâmetros ajustados para cada estação.

Definidas as curvas chave de sedimentos para cada estação, foi calculada a descarga sólida correspondente às vazões líquidas com permanência de 2, 5, 10, 33 e 50% correspondendo aos períodos de retorno 50, 20, 10, 3 e 2 anos, respectivamente.

As vazões líquidas com permanência de 2, 5, 10, 33 e 50 anos, foram obtidas das curvas de permanência de vazões calculadas pelo programa HIDRO 9.0, a partir das séries históricas de dados de vazão disponíveis na home page da Agência Nacional de Águas (ANA), <http://www.ana.gov.br>.

A produção anual de sedimentos de cada bacia foi calculada pela integração da curva de permanência de sedimentos, calculada a partir das descargas líquidas com permanência de 2, 5, 10, 33 e 50%, utilizando-se a equação da curva chave de sedimentos envoltória média superior.

2.2 - Estimativa do aporte de sedimentos aos reservatórios

A estimativa do aporte de sedimentos aos reservatórios será feita considerando-se a produção específica de sedimentos na estação mais próxima, multiplicada pela área da bacia contribuinte ao reservatório.

2.3 - Estimativa do assoreamento do reservatório.

O cálculo do assoreamento dos reservatórios, foi feito pelo método de Lara e Pemberton, utilizando-se o Programa Sediment, integrante do livro "Hidrossedimentologia Prática", de Carvalho (1993).

Para o cálculo da eficiência de retenção foi usada a curva de Brune (1953), envoltória superior. A granulometria do sedimento afluyente foi obtida de Eletrobrás (1992). Na bacia do Rio das Velhas, foram usadas as distribuições granulométricas do sedimento em suspensão correspondentes às estações 41340000 – Ponte Raul soares, 41410000 – Jequitibá, 41650000- Ponte

do Licínio e 41818000 - Santo Hipólito. Na bacia do rio Paracatu, foi usada a distribuição granulométrica do sedimento em suspensão correspondente à estação 42980001- Fazenda Porto Alegre e na bacia do rio Urucuia foi usada a da estação 43980001 – Barra do Escuro. Esses dados foram usados por serem os únicos disponíveis.

A estimativa dos volumes de assoreamento dos reservatórios, foi feita considerando que cada reservatório operará isoladamente, sem reservatórios de montante.

2.4 - Estimativa da altura do depósito no pé da barragem e correção das curvas cota x área x volume.

A estimativa da altura do depósito no pé da barragem e a correção das curvas Cota x Área x Volume, foi feita pelo Método Empírico de Redução de Área, proposto por Borland e Miller (1958).

As curvas Cota x Área x Volume dos reservatórios, disponíveis, apresentam valores de cota de 10 em 10 m. Por essa razão, em alguns reservatórios, houve a necessidade de melhorar a discretização dessas curvas, com o objetivo de possibilitar a aplicação do método. A discretização foi feita pela interpolação linear entre as cotas conhecidas. Nos reservatórios em que não houve problema na aplicação do método foram utilizadas as curvas originais sem valores interpolados.

Em alguns reservatórios, nos quais o aporte de sedimentos foi muito baixo, a ponto de não se obter resultados significativos para a aplicação do método de cálculo do assoreamento, os cálculos foram refeitos considerando-se um acréscimo de 1(%) ao ano no aporte de sedimentos ao reservatório.

Na bacia do Rio Paracatu, o reservatório Preto foi calculado considerando duas alternativas, a primeira sem considerar a retenção de sedimentos no reservatório de Queimadas e a segunda considerando que o reservatório de Queimadas retém 80% do aporte de sedimentos calculado para o reservatório Preto. Essa opção foi chamada de Preto- Queimadas.

3 - RESULTADOS

3.1 - Curvas chave de sedimentos

A Tabela 2 apresenta, para cada estação sedimentométrica utilizada, os valores dos parâmetros a e b da equação 1, para a curva chave de sedimentos média envoltória superior e os valores do coeficiente de determinação obtido no ajuste.

3.2 - Produção anual de sedimentos

A Tabela 3 apresenta as vazões, líquidas e sólidas, com permanência de 2, 5, 10, 33 e 50% correspondendo aos períodos de retorno 50, 20, 10, 3 e 2 anos, respectivamente, e a produção anual de sedimentos das bacias de drenagem dos postos sedimentométricos utilizados. A Tabela 4 apresenta a produção anual de sedimentos, em cada bacia, calculada pela integração da curva de permanência.

Tabela 2 - Valores dos parâmetros a e b da equação das curvas-chave de sedimentos para cada estação (eq.1).

Sub-Bacia	Código	Nome	Curso de Água	a	b	R ²
Rio Das Velhas	41199998	Honorio Bicalho- Mon.	Rio das Velhas	1,8884	2,0518	0,42
	41200000	Honorio Bicalho	Rio das Velhas	1,1091	2,3262	0,80
	41250000	Vespasiano	Rio das Velhas	3,3657	2,0166	0,77
	41340000	Ponte Raul Soares	Rio das Velhas	0,5514	2,0177	0,79
	41340005	Ponte Raul Soares-Jus.	Rio das Velhas	2,2391	1,848	0,79
	41410000	Jequitiba	Rio das Velhas	0,0465	2,478	0,75
	41650002	Ponte Do Licinio-Jusa.	Rio das Velhas	0,0089	2,632	0,87
	41780002	Presidente Juscelino-Jus.	Rio Paraúna	0,2321	1,9691	0,85
	41818000	Santo Hipolito	Rio das Velhas	0,0179	2,3028	0,78
	41990000	Varzea da Palma	Rio das Velhas	0,0108	2,2913	0,87
Rio Urucuia	43429998	Arinos-Montante	Rio Urucuia	0,0892	2,0588	0,8122
	43980002	Barra do Escuro (PCD)	Rio Urucuia	0,0053	2,4721	0,9039
Rio Paracatu	42395000	Santa Rosa	Rio Paracatú	0,3886	1,7884	0,8027
	42930000	Porto do Cavalo	Rio Paracatú	0,0454	2,0682	0,7556
Nota-se que com exceção da estação Honório Bicalho - Montante os ajuste variaram de razoáveis a bons. Os dados da estação Honório Bicalho – Montante, no entanto, não foram utilizados para o cálculo do assoreamento dos reservatórios, como pode ser observado na tabela 5, que apresenta as estações de referência para cada reservatório analisado.						

Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram que as maiores concentrações anuais médias de sedimentos foram observadas na bacia do Rio das Velhas, cujos valores variaram de 208 mg/l a 1981 mg/l, com produções específicas variando de 184,2 t/km²/ dia na estação Várzea da Palma, com área de drenagem de 25.940 km² a 2.121,4 t/km²/ dia na estação Honório Bicalho, com área de drenagem de 1.642 km². Na estação Honório Bicalho – Montante, a produção específica observada foi de 703,8 t/km²/ dia. Para fins de cálculo do aporte de sedimentos aos reservatórios de jusante foi utilizado o valor médio de 1412,6 t/km²/ dia para a área de drenagem correspondente à estação Honório Bicalho. O mesmo procedimento foi adotado com relação à área de drenagem da estação Ponte Raul Soares, para a qual foi utilizada a produção específica média de 697,4 t/km²/ dia.

Para fins de comparação, são também apresentados na Tabela 4 os valores de produção específica de sedimentos considerados normais, para bacias de mesma área de drenagem que as áreas de drenagem controladas pelas estações em estudo, segundo a Publicação 140 do PNUD –

Tabela 3 - Dados de permanência das vazões líquidas e sólidas e produção anual de sedimentos nas estações sedimentométricas estudadas.

Estação	Permanência	Vazão Líquida	Descarga Sólida Total		Concentração Total de Sedimentos
			t/dia	ton/ano	
	(%)	(m3/s)			mg/l
411999	2	118,0	33.58	245.158	3.294
411999	5	74,6	13.10	239.212	2.034
411999	10	53,7	6.677	243.719	1.439
411999	33	28,8	1.860	223.987	747
411999	50	22,4	1.110	202.645	574
412000	2	139,0	107.1	782.302	8.923
412000	5	90,0	38.98	711.529	5.014
412000	10	54,5	12.13	443.067	2.578
412000	33	42,4	6.769	815.372	1.848
412000	50	33,8	3.995	729.121	1.368
412500	2	41,5	6.151	44.905	1.718
412500	5	26,5	2.496	45.547	1.090
412500	10	17,5	1.081	39.453	715
412500	33	8,0	225	27.128	324
412500	50	6,1	127	23.242	243
413400	2	323,0	63.72	465.166	2.283
413400	5	214,0	27.76	506.764	1.502
413400	10	152,0	13.92	508.236	1.060
413400	33	69,4	2.863	344.814	477
413400	50	50,7	1.519	277.284	347
413400	2	363,0	120.4	879.233	3.840
413400	5	241,0	56.49	1.031.1	2.713
413400	10	164,0	27.74	1.012.5	1.958
413400	33	81,5	7.619	917.698	1.082
413400	50	57,2	3.960	722.777	801
414100	2	404,0	133.6	975.863	3.830
414100	5	266,0	47.45	866.109	2.065
414100	10	183,0	18.78	685.646	1.188
414100	33	88,6	3.113	374.974	407
414100	50	61,1	1.240	226.217	235
416500	2	612,0	192.3	1.404.2	3.638
416500	5	401,0	63.22	1.153.7	1.825
416500	10	271,0	22.54	822.731	963
416500	33	121,0	2.699	325.153	258
416500	50	92,5	1.331	242.962	167
417800	2	499,0	47.69	348.199	1.106

Estação	Permanência	Vazão Líquida	Descarga Sólida Total		Concentração Total de Sedimentos
			t/dia	ton/ano	
	(%)	(m3/s)			mg/l
417800	5	308,0	18.44	336.623	693
417800	10	192,0	7.273	265.471	438
417800	33	63,6	826	99.465	150
417800	50	48,9	492	89.816	116
418180	2	1.007,0	147.3	1.075.3	1.693
418180	5	671,0	57.84	1.055.5	998
418180	10	463,0	24.61	898.351	615
418180	33	188,0	3.089	372.041	190
418180	50	121,0	1.120	204.340	107
419900	2	1.486,0	200.2	1.461.4	1.559
419900	5	981,0	77.31	1.410.9	912
419900	10	675,0	32.82	1.198.1	563
419900	33	264,0	3.820	460.099	167
419900	50	168,0	1.356	247.479	93
423950	2	740,0	52.58	383.848	822
423950	5	598,0	35.92	655.569	695
423950	10	414,0	18.61	679.265	520
423950	33	145,0	2.850	343.321	228
423950	50	94,5	1.325	241.896	162
429300	2	2.015,0	309.7	2.260.8	1.779
429300	5	1.579,0	187.0	3.413.6	1.371
429300	10	1.166,0	99.90	3.646.6	992
429300	33	441,0	13.37	1.610.9	351
429300	50	289,0	5.581	1.018.4	223
434299	2	573,0	42.54	310.582	859
434299	5	477,0	29.16	532.306	708
434299	10	353,0	15.69	572.818	515
434299	33	133,0	2.104	253.371	183
434299	50	79,8	735	134.113	107
439800	2	1.087,0	169.8	1.240.1	1.809
439800	5	794,0	78.14	1.426.2	1.139
439800	10	563,0	33.40	1.219.2	687
439800	33	212,0	2.987	359.764	163
439800	50	124,0	793	144.773	74

Tabela 4 - Resumo da produção anual de sedimentos nas estações sedimentométricas estudadas.

Sub-Bacia	Código	Área de Drenagem (km ²)	Concentração Média Total (mg/l)	Produção Específica (t/km ² /ano)	Produção Específica Normal* (t/km ² /ano)	Rel**	Área Incremental (km ²)	Produção Específica Incremental (t/km ² /ano)	Observação
Rio Das Velhas	41199998	1.642	845	703,8	594,7	1,18	1.642		Erosão***
	41200000	1.642	1.981	2.121,4	594,7	3,57	1.642	1412,6	Erosão
	41250000	676	389	268,1	749,5	0,36	674		Erosão
	41340000	4.780	558	439,9	450,1	0,98	2.464	338,3	Erosão
	41340005	4.780	1.166	954,9	450,1	2,12	2.464	338,3	Erosão
	41410000	6.292	550	497,4	419,0	1,19	1.512	-135,1	Deposição****
	41650002	10.980	429	359,7	362,4	0,99	4.688	174,9	Erosão
	41780002	3.912	208	291,4	474,3	0,61	3.912		Erosão
	41818000	16.528	262	218,2	325,7	0,67	1.636	-906,6	Deposição
	41990000	25.940	235	184,2	289,6	0,64	9.412	124,6	Erosão
Rio Urucuia	43429998	11.710	218	152,1	356,4	0,43	11.856	152,1	Erosão
	43980002	24.700	253	178,1	293,3	0,61	12.802	202,1	Erosão
Rio Paracatu	42395000	12.915	259	178,4	347,4	0,51	12.915	178,4	Erosão
	42930000	36.976	431	323,2	264,1	1,22	24.061	400,9	Erosão
* Produção Específica Normal: Valores considerados normais para a produção específica em função da área de drenagem, pelo PNUD (1977).									
** Rel: Relação entre a produção específica observada e a produção considerada normal pelo PNUD (1977)									
*** Erosão: indica que no trecho entre a estação considerada e as estações de montante ocorre erosão.									
**** Deposição: indica que no trecho entre a estação considerada e as estações de montante ocorre deposição.									

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento e Governo dos Países da Centro América realizado em 1977, citado por Carvalho (1994), cujos valores podem ser sintetizados pela equação 2. Os resultados mostram que nas estações da bacia do rio das Velhas a relação entre a produção específica observada e a considerada normal variou de 0,36 a 3,57, com 4 estações com produção específica acima da considerada normal. Na bacia do Rio Urucuia, as duas estações estudadas apresentaram valores abaixo dos considerados normais e na bacia do Rio Paracatu, onde foram estudadas 2 estações, a produção específica observada na estação de jusante, 42930000 - Porto do Cavalo, está acima da considerada normal com relação 1,22. Observa-se nesse caso que a produção específica na área incremental entre a estação 42395000 - Santa Rosa e a estação 42930000 - Porto do Cavalo, 400,9 t/km²/ano, é superior à produção específica média de toda a bacia e a sua relação com a produção específica considerada normal para a área de drenagem correspondente, 295,3 t/km²/ano, é de 1,35.

$$Y_n = 4097,5.A^{-0,2607} \quad (2)$$

Onde:

Y_n = produção específica de sedimentos em t/km²/ano considerada normal, segundo o PNUD (1977), citado por Carvalho 1994;

$A = \text{área de drenagem bacia contribuinte (Km}^2\text{)}$

A tabela 4 e a figura 3 mostram os trechos em que ocorrem erosão e deposição, na bacia do Rio das Velhas. Ocorre deposição de sedimentos no trecho compreendido entre as estações ponte Raul Soares (41340005) e Jequitiba (41410000) e na área incremental compreendida entre as estações 41780002 - Presidente Juscelino - Jusante, no Rio Paraibuna e 416500002 - Ponte do Licínio Jusante e, a estação 41818000 – Santo Hipólito, representadas pela produção específica negativa.. Nos demais trechos ocorre erosão. Nas bacias dos rios Paracatu e Urucuia não foram detectados trechos com deposição de sedimentos.

3.3 - Estimativa do aporte de sedimentos aos reservatórios

Para a estimativa do aporte de sedimentos aos reservatórios foram utilizadas as produções específicas das estações listadas na tabela 4. As figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam os fluxogramas das distribuições das estações sedimentométricas e dos reservatórios previstos nas bacias do rio das Velhas, do rio Paracatu e do rio Urucuia, respectivamente. A tabela 5 apresenta os resultados para o aporte médio anual de sedimentos aos reservatórios estudados nessas bacias. Em todos os casos as porcentagens de areia, silte e argila que compõem a distribuição granulométrica dos sedimentos em suspensão, foram obtidas do “Diagnóstico das Condições Sedimentológicas dos Principais Rios Brasileiros”, elaborado pela Eletrobrás em 1992. Na bacia do Rio das Velhas, foram usadas as distribuições granulométricas do sedimento em suspensão correspondentes às estações 41340000 – Ponte Raul Soares, 41410000 – Jequitibá, 41650000 - Ponte do Licínio e 41818000 – Santo Hipólito. Na bacia do rio Paracatu, foi usada a distribuição granulométrica do sedimento em suspensão correspondente à estação 42980001 - Fazenda Porto Alegre e na bacia do rio Urucuia foi usada a da estação 43980001 – Barra do Escuro. Esses dados foram usados por serem os únicos disponíveis.

3.4 - Cálculo do assoreamento dos reservatório em períodos pré-estabelecidos

As tabelas 6, 7 e 8 apresentam os resultados do cálculo do assoreamento dos reservatórios, considerando vários períodos de tempo após o enchimento dos mesmos. Nesta tabela são apresentadas as relações entre os volumes de sedimentos depositado e os volumes dos reservatórios.

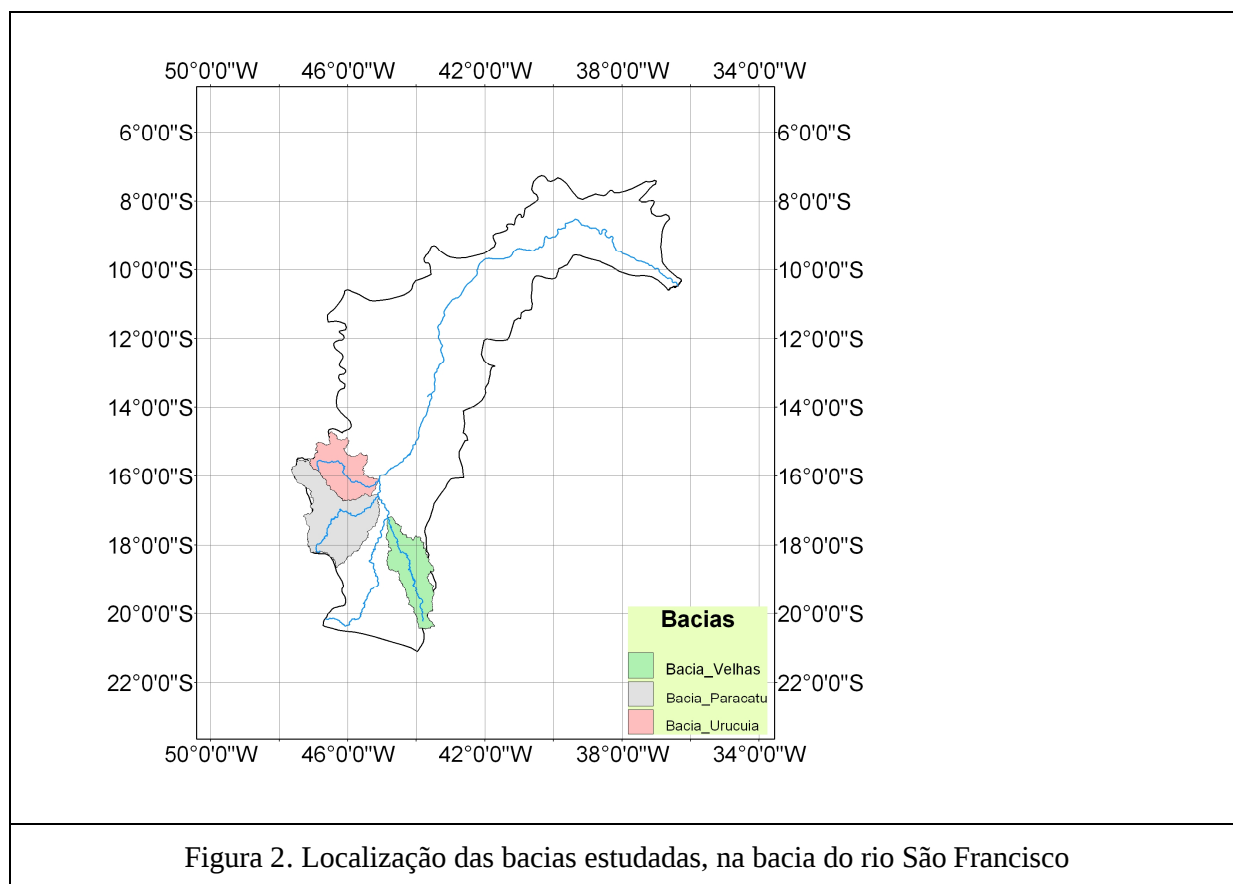
3.5 - Cálculo da altura do depósito no pé do reservatório.

As tabelas 9, 10 e 11 apresentam os cálculos da altura do depósito no pé da barragem e os dados das curvas Cota x Volume corrigidas, considerando o tempo de 100 anos após o enchimento dos reservatórios.

Observar que existem reservatórios em que esses cálculos são apresentados para os tempos de 50, 100 e 200 anos. Em alguns reservatórios, não foi possível realizar os cálculos para todos os 3

tempos inicialmente programados, seja em função da baixa discretização das curvas Cota X Área x Volume original, seja em função do baixo aporte de sedimentos ao reservatório. Nesse caso são apresentados os resultados apenas para os tempos em que foi possível a aplicação adequada do método e, são também apresentados os resultados obtidos considerando-se um acréscimo anual de 1% no aporte de sedimentos aos reservatórios.

O reservatório Raul Soares deve ter a cota da soleira do reservatório revisada. Com a cota 670 m, só foi possível o cálculo para o tempo de assoreamento de 50 anos. Indicando que o aporte de sedimentos é alto, havendo a possibilidade de assoreamento do volume útil do reservatório em um tempo inferior a 100 anos. Considerando a cota de 680 m, como o nível máximo de operação do reservatório, obteve-se a cota de volume nulo, em 100 anos de operação, igual a 658,9 m e para 200 anos 668,8. Quando o cálculo foi efetuado com a cota de 670 m para a soleira do vertedor, a altura de depósito calculada para 50 anos de assoreamento foi de 654,1 m.



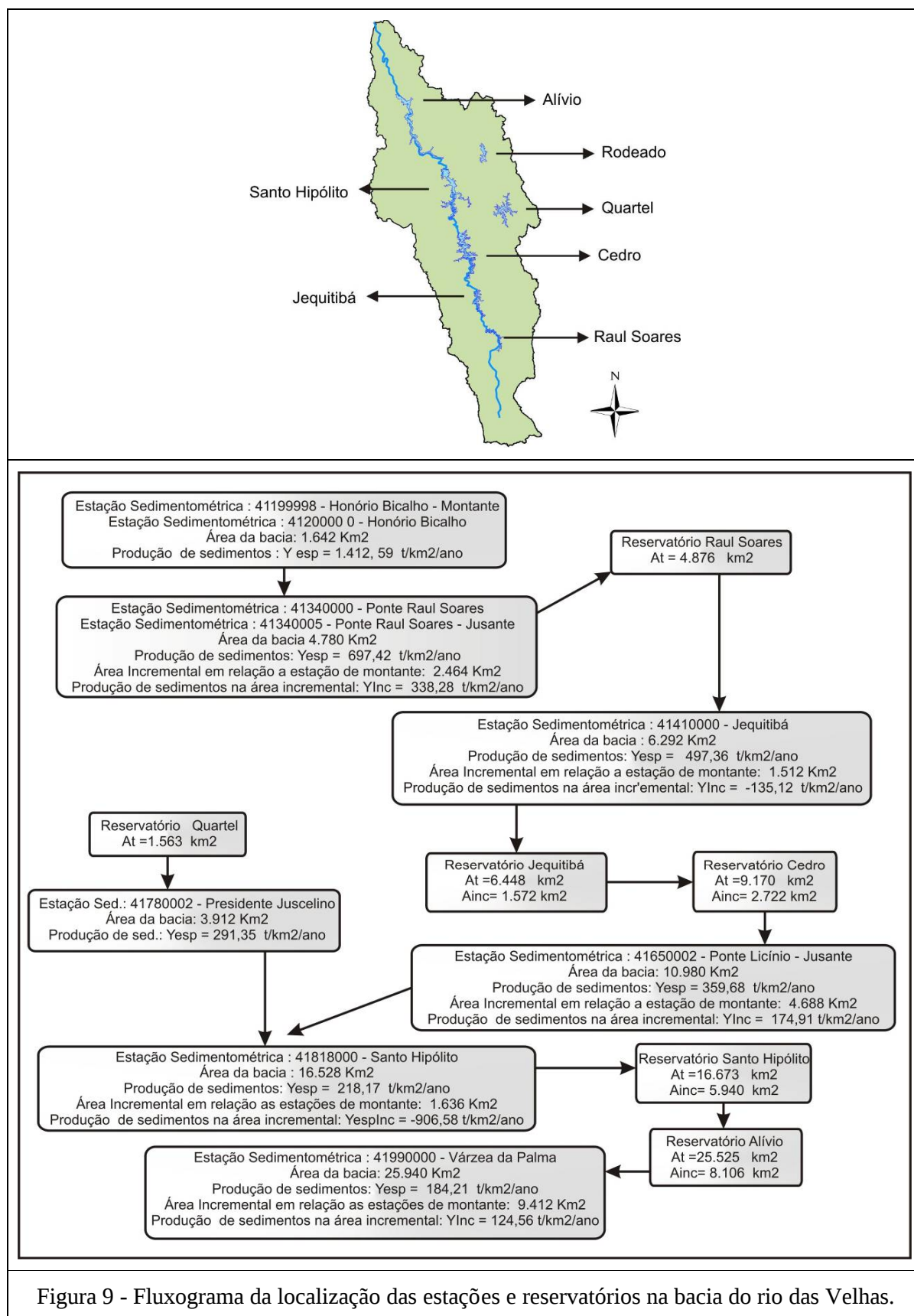


Figura 9 - Fluxograma da localização das estações e reservatórios na bacia do rio das Velhas.

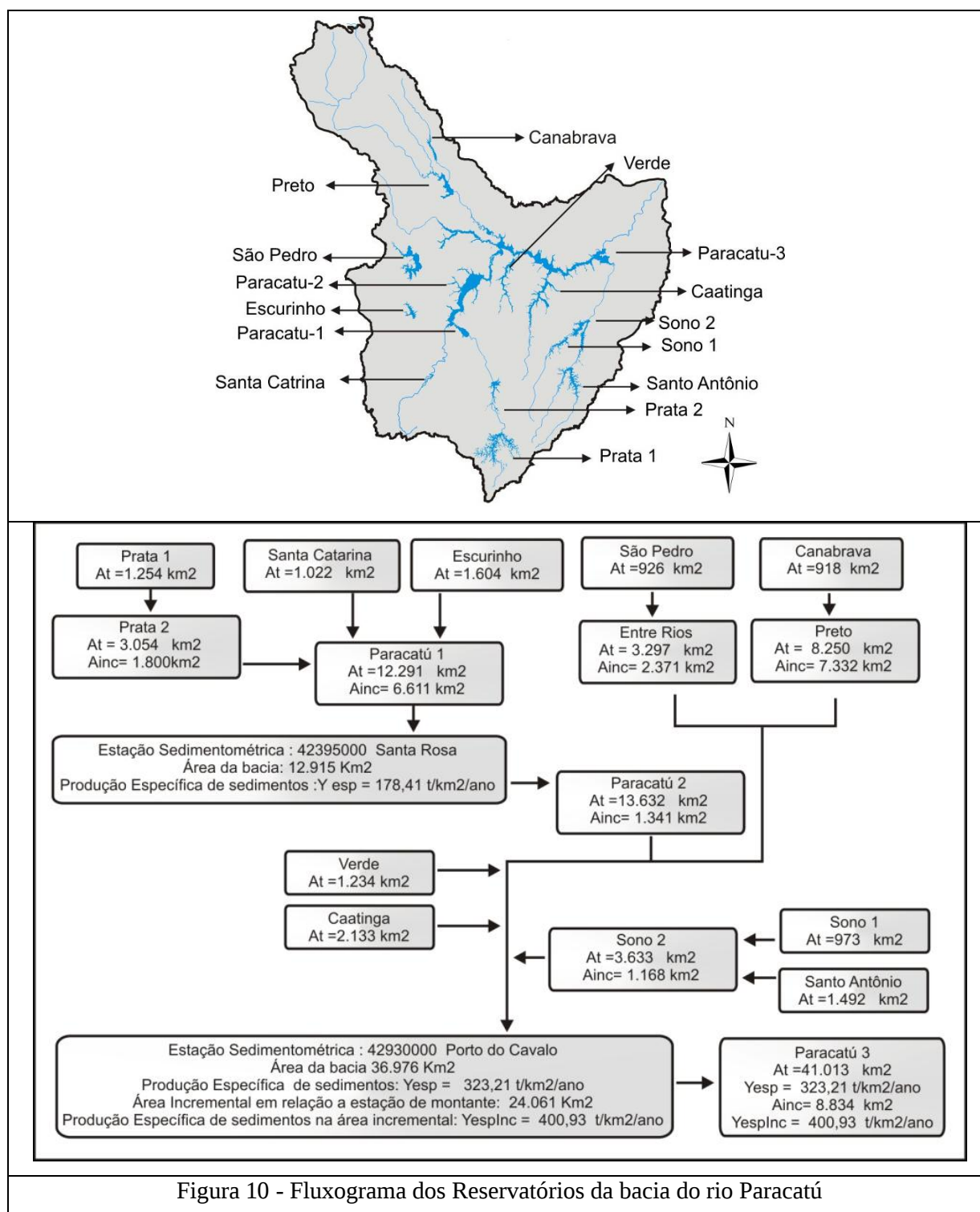


Figura 10 - Fluxograma dos Reservatórios da bacia do rio Paracatu

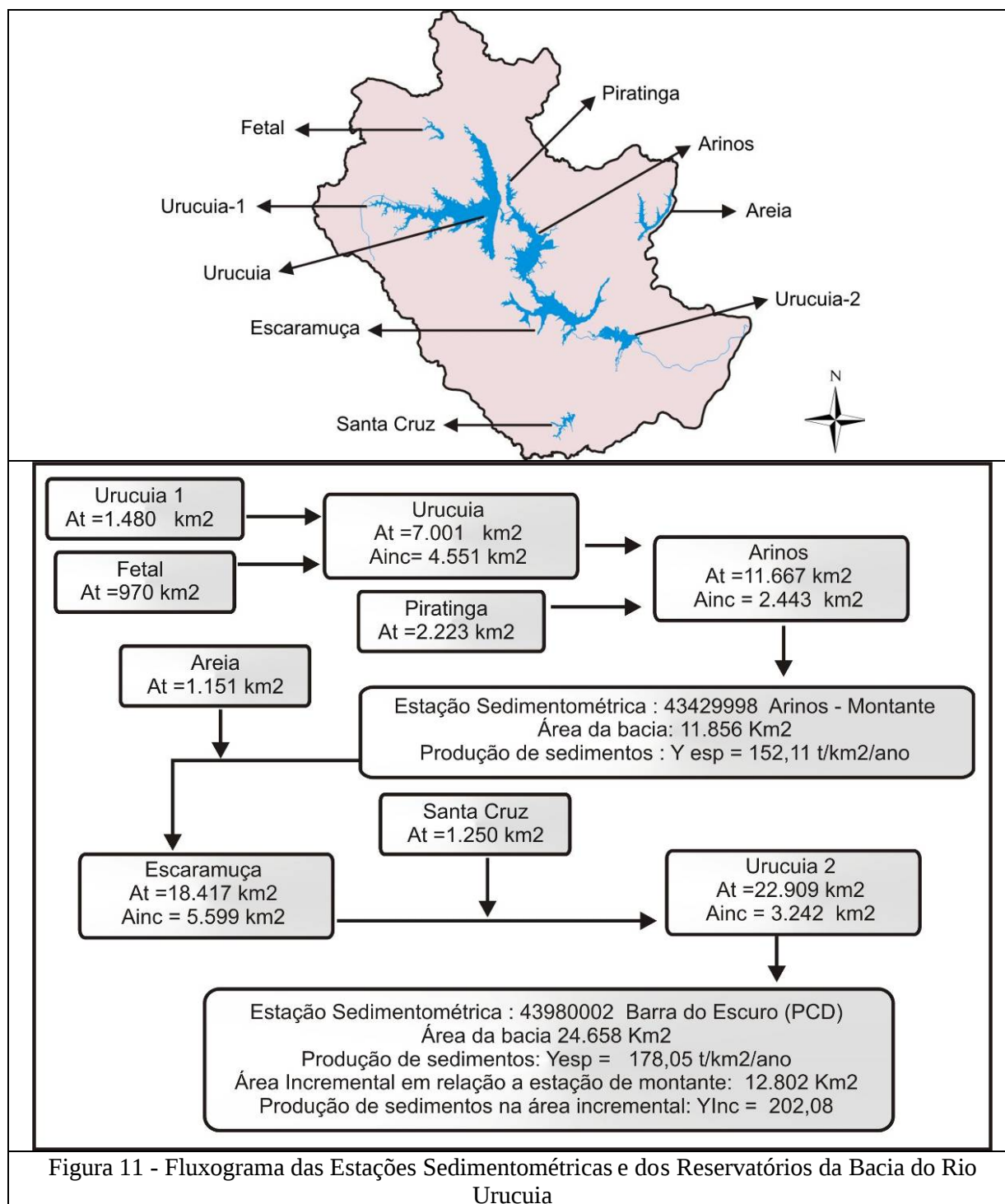


Figura 11 - Fluxograma das Estações Sedimentométricas e dos Reservatórios da Bacia do Rio Urucuia

Tabela 5 - Estimativa do aporte médio anual de sedimentos aos reservatórios das bacias dos rios das Velhas, Urucuia e Paracatu.

Sub-Bacia	Reservatório	Estação Referência	Área da bacia de drenagem (km ²)		Produção específica de sedimentos		Aporte de sedimentos ao reservatório		Granulometria do material em susp.(%)		
			Inc.	Total	Bacia total	Bacia inc.	Bacia total	Bacia inc.	Areia	Silte	Argila
Rio das Velhas	Raul Soares	41340000 41340005 41410000	4.876	4.876	681,03	681,03	3.320.696	3.320.696	31,0	37,0	24,0
	Jequitibá	41410000 41650002	1.572	6.448	489,56	- 104,34	3.156.675	0	99,8	0,2	0,0
	Cedro	41650002 41410000	2.722	9.170	396,16	174,91	3.632.780	476.105	11,5	72,0	16,5
	Cuartel	41780002	1.563	1.563	291,36	291,36	455.396	455.396	11,5	72,0	16,5
	Santo Hipólito	41818000 41990000	5.941	16.673	217,36	453,20	3.623.975	2.692.474	4,0	79,0	17,0
	Rodeado	41990000	746	746	124,56	124,56	92.922	92.922	11,5	72,0	16,5
	Alívio	41990000	8.106	25.525	185,17	124,56	4.726.580	1.009.683	6,0	57,0	37,0
Rio Urucuia	Urucuia 1	43429998	1.480	1.480	152,11	152,11	225.123	225.123	9,0	58,0	33,0
	Fetal	43429998	970	970	152,11	152,11	147.547	147.547	9,0	58,0	33,0
	Urucuia	43429998	4.551	7.001	152,11	152,11	1.064.922	692.253	9,0	58,0	33,0
	Piratinga	43429998	2.223	2.223	152,11	152,11	338.141	338.141	9,0	58,0	33,0
	Arinos	43429998	2.443	11.667	152,11	152,11	1.774.667	371.605	9,0	58,0	33,0
	Areia	43980002	1.151	1.151	202,08	202,08	232.594	232.594	9,0	58,0	33,0
	Escaramuça	43980002 43429998	5.599	18.417	169,91	200,39	3.129.232	1.121.984	9,0	58,0	33,0
	Santa Cruz	43980002	1.250	1.250	202,08	202,08	252.600	252.600	9,0	58,0	33,0
	Urucuia 2	43980002 43429998	3.242	22.909	176,22	202,08	4.037.024	655.143	9,0	58,0	33,0
Rio Paracatu	Canabrava	42930000	918	918	400,93	400,93	368.054	368.054	7,0	88,5	4,5
	São Pedro	42930000	926	926	400,93	400,93	371.261	371.261	7,0	88,5	4,5
	Entre Rios	42930000	2.371	3.297	400,93	400,93	1.321.866	950.605	7,0	88,5	4,5
	Preto	42930000	7.332	8.250	400,93	400,93	3.307.673	2.939.619	7,0	88,5	4,5
	Escurininho	42395000	1.604	1.604	178,41	178,41	286.170	286.170	7,0	88,5	4,5
	Sta Catarina	42395000	1.022	1.022	178,41	178,41	182.335	182.335	7,0	88,5	4,5
	Prata 1	42395000	1.254	1.254	178,41	178,41	223.726	223.726	7,0	88,5	4,5
	Prata 2	42395000	1.800	3.054	178,41	178,41	544.864	321.138	7,0	88,5	4,5
	Paracatu 1	42395000	6.611	12.291	178,41	178,41	2.192.837	1.179.469	7,0	88,5	4,5
Obs: O aporte de sedimentos ao reservatório considerando apenas a produção da bacia incremental seria a carga resultante e caso o(s) reservatório (s) de montante retivesse(m) todo o sedimento que recebem.											

Tabela 6 - Estimativa da relação entre o volume assoreado e o volume dos reservatórios da bacia do rio das Velhas em função do tempo após o enchimento.

Tempo (Anos)	Alívio	Cedro	Jequetibá	Quartel	Raul Soares	Raul Soares , com a soleira do vertedor na cota 480	Santo Hipólito
10	0,041	0,01	0,025	0,011	0,062	0,021	0,025
20	0,083	0,019	0,05	0,022	0,123	0,043	0,049
30	0,123	0,029	0,075	0,033	0,184	0,064	0,074
40	0,164	0,038	0,1	0,044	0,244	0,085	0,098
50	0,205	0,048	0,125	0,055	0,305	0,107	0,123
60	0,245	0,057	0,15	0,066	0,364	0,128	0,147
70	0,285	0,067	0,175	0,077	0,424	0,149	0,172
80	0,325	0,076	0,199	0,088	0,482	0,171	0,196
90	0,364	0,086	0,224	0,099	0,54	0,192	0,22
100	0,403	0,095	0,249	0,11	0,597	0,213	0,245
120	0,481	0,114	0,298	0,133	0,708	0,256	0,293
140	0,557	0,133	0,348	0,155	0,813	0,299	0,341
160	0,631	0,152	0,397	0,177	0,906	0,341	0,389
180	0,703	0,172	0,446	0,199	0,975	0,384	0,437
200	0,772	0,191	0,494	0,221	0,994	0,427	0,484

Tabela 7 - Estimativa da relação entre o volume assoreado e o volume dos reservatórios da bacia do rio Paracatu em função do tempo após o enchimento..

Tempo (Anos)	Caatinga (1%)	Caatinga	Entre-Rios	Paracatu 1	Paracatu 2	Paracatu 3	Prata 2 (1%)	Prata 2	Preto	Sono 2 (1%)	Sono 2	Preto-Queimados
10	0,007	0,007	0,003	0,012	0,045	0,038	0,004	0,004	0,063	0,005	0,005	0,013
20	0,015	0,013	0,007	0,025	0,089	0,077	0,009	0,008	0,127	0,01	0,009	0,025
30	0,023	0,02	0,01	0,037	0,133	0,115	0,014	0,012	0,189	0,016	0,014	0,038
40	0,033	0,027	0,013	0,049	0,177	0,153	0,02	0,016	0,252	0,023	0,019	0,051
50	0,044	0,033	0,017	0,061	0,221	0,191	0,026	0,02	0,313	0,03	0,023	0,063
60	0,055	0,04	0,02	0,073	0,264	0,23	0,033	0,024	0,374	0,039	0,028	0,076
70	0,068	0,047	0,024	0,086	0,307	0,267	0,041	0,028	0,435	0,048	0,033	0,089
80	0,082	0,053	0,027	0,098	0,35	0,305	0,049	0,032	0,494	0,057	0,037	0,101
90	0,098	0,06	0,03	0,11	0,392	0,343	0,058	0,036	0,553	0,068	0,042	0,114
100	0,115	0,067	0,034	0,122	0,434	0,38	0,069	0,04	0,611	0,081	0,047	0,127
120	0,155	0,08	0,04	0,147	0,517	0,455	0,093	0,048	0,723	0,109	0,056	0,152
140	0,204	0,094	0,047	0,171	0,597	0,528	0,122	0,056	0,827	0,143	0,065	0,177
160	0,264	0,107	0,054	0,196	0,675	0,6	0,158	0,064	0,915	0,185	0,075	0,202
180	0,337	0,12	0,061	0,22	0,748	0,671	0,201	0,072	0,977	0,236	0,084	0,227
200	0,426	0,134	0,067	0,245	0,816	0,74	0,255	0,08	0,992	0,298	0,094	0,252

Tabela 8 - Estimativa da relação entre o volume assoreado e o volume dos reservatórios da bacia do rio Urucuia em função do tempo após o enchimento.

Tempo (Anos)	Urucuia	Escaramuça	Piratinga	Arinos (1%)	Arinos	Urucuia 2, com a crista do vertedor na cota 485	Urucuia 2 (1%)
10	0,007	0,019	0,004	0,013	0,012	0,024	0,029
20	0,014	0,041	0,008	0,026	0,024	0,049	0,062
30	0,022	0,064	0,013	0,042	0,036	0,073	0,098
40	0,029	0,09	0,018	0,059	0,048	0,098	0,137
50	0,036	0,119	0,024	0,077	0,059	0,122	0,18
60	0,043	0,15	0,03	0,098	0,071	0,146	0,228
70	0,05	0,185	0,037	0,143	0,094	0,171	0,281
80	0,057	0,224	0,044	0,146	0,095	0,195	0,338
90	0,065	0,266	0,053	0,174	0,107	0,219	0,401
100	0,072	0,313	0,062	0,204	0,119	0,243	0,47
120	0,086	0,42	0,084	0,276	0,142	0,291	0,626
140	0,101	0,55	0,111	0,362	0,166	0,339	0,805
160	0,115	0,703	0,143	0,468	0,19	0,387	0,972
180	0,129	0,875	0,183	0,595	0,214	0,434	0,994
200	0,144	0,995	0,231	0,745	0,237	0,481	0,994

Tabela 9 – Curvas cota x volume dos reservatórios da bacia do rio Paracatú

Reserv.	Cota original (m)	Volume original (hm³)	Volume revisado (hm³)	Reserv.	Cota original (m)	Volume original (hm³)	Volume revisado (hm³)	Reserv.	Cota original (m)	Volume original (hm³)	Volume revisado (hm³)
Paracatú 3	495,00	2.300,27	1.262,38	Queimadas	535,00	346,67	294,57	Sono 2 (1%)	645,00	2.459,14	2.242,39
	490,00	691,40	60,14		530,00	130,37	92,21		635,00	1.470,07	1.257,78
	486,00	419,36	0,00		525,00	68,68	46,88		625,00	782,08	592,81
	485,00	351,35	0,00		520,00	6,98	0,00		615,00	349,06	208,46
	480,00	11,31	0,00		515,00	2,62	0,00		610,00	189,48	81,03
	475,00	0,00	0,00		512,00	0,00	0,00		605,00	116,29	42,17
	Cota*: 485,39 m				Cota*: 520,48 m				600,00	43,11	1,92
Caatinga (1%)	515,00	919,08	792,04	Prata 2	595,00	1.105,31	1.058,27	Paracatú 2	596,00	26,50	0,00
	510,00	455,03	333,02		585,00	766,93	720,70		590,00	1,58	0,00
	505,00	272,55	170,18		575,00	496,36	452,84		586,70	0,00	0,00
	500,00	90,08	23,94		565,00	289,25	251,06		Cota*: 595,84 m		
	495,00	45,19	21,94		555,00	139,13	109,85		510,00	641,50	440,53
	494,00	36,21	0,00		550,00	77,47	54,45		505,00	343,69	171,41
	490,00	0,30	0,00		545,00	42,02	26,99		501,00	105,44	0,00
	488,50	0,00	0,00		540,00	6,57	2,34		500,00	45,88	0,00
	Cota*: 492,87 m				537,00	0,00	0,00		494,50	0,00	0,00
Preto	535,00	346,67	105,31	Cota*: 538,97 m			Cota*: 501,01 m				
	530,00	130,37	0,00	Paracatú 1	525,00	1.241,65	1.054,45	Entre Rios	515,00	263,52	150,44
	525,00	68,68	0,00		520,00	492,38	333,92		510,00	74,06	1,89
	520,00	6,98	0,00		515,00	218,84	149,23		509,00	65,83	0,00
	515,00	2,62	0,00		513,00	109,42	0,00		505,00	32,92	0,00
	512,00	0,00	0,00		511,00	0,00	0,00		501,00	0,00	0,00
	Cota*: 530,21 m				Cota*: 512,71 m				Cota*: 509,60 m		
* Altitude no pé da barragem (cota de volume nulo) após 100 anos de depósito no respectivo reservatório.											

Tabela 10 – Curvas cota xvolume dos reservatórios da bacia do rio das Velhas

Sub-Bacia	Cota original (m)	Volume original (hm³)	Volume revisado (hm³)	Sub-Bacia	Cota original (m)	Volume original (hm³)	Volume revisado (hm³)
Alívio	510,00	1.101,41	657,06	Quartel	965,00	222,09	185,82
	505,00	572,41	167,10		955,00	36,22	17,49
	500,00	265,45	0,00		950,00	12,56	0,99
	495,00	84,10	0,00		945,00	7,06	0,00
	490,00	0,00	0,00		940,00	3,94	0,00
	Cota*: 500,03 m				935,00	1,88	0,00
	Cedro	605,00	3.419,59		3.093,71	930,00	0,66
595,00		1.911,59	1.591,58		924,00	0,00	0,00
585,00		950,15	667,38		Cota*: 937,81 m		
575,00		377,44	178,57	Raul Soares, com a soleira do vertedor na cota 680.	680,00	1.309,43	1.030,01
570,00		208,62	65,15		670,00	446,55	187,27
565,00		100,76	14,87		660,00	153,41	7,02
560,00		38,61	0,00		655,00	75,63	0,00
555,00		9,91	0,00		650,00	29,96	0,00
550,00		0,00	0,00		645,00	8,09	0,00
Cota*: 560,69 m			640,00		0,00	0,00	
Jequitibá	640,00	809,78	608,21		Cota*: 658,69 m		
	635,00	530,35	331,79	Santo Hipólito	540,00	1.344,05	1.015,31
	630,00	328,04	144,62		535,00	760,51	474,94
	625,00	188,85	41,65		530,00	343,33	151,46
	620,00	95,24	5,82		525,00	108,56	17,83
	615,00	39,59	0,00		520,00	26,21	0,00
	610,00	11,73	0,00		515,00	6,16	0,00
	605,00	0,00	0,00		510,00	0,00	0,00
	Cota*: 619,02 m				Cota*: 523,37 m		
* Altitude no pé da barragem (cota de volume nulo) após 100 anos de depósito no respectivo reservatório.							

* Altitude no pé da barragem (cota de volume nulo) após 100 anos de depósito no respectivo reservatório.

Tabela 11 – Curvas cota xvolume dos reservatórios da bacia do rio Urucuia

Reserv.	Cota original (m)	Volume original (hm³)	Volume revisado (hm³)	Reserv.	Cota original (m)	Volume original (hm³)	Volume revisado (hm³)
Urucuia	530,00	786,47	694,51	Arinos. (1%)	505,00	809,14	540,01
	520,00	251,50	197,38		500,00	157,58	22,88
	510,00	41,81	24,87		499,00	126,07	0,00
	500,00	0,19	0,00		495,00	0,00	0,00
	499,00	0,00	0,00		Cota*: 498,54 m		
	Cota*: 505,31 m			Urucuia 2, com a soleira do vertedor na cota 485 m.	485,00	1.594,63	1.206,86
Escaramuça	495,00	1.218,93	782,01		480,00	603,89	258,90
	490,00	90,91	0,00		475,00	302,13	149,84
	485,00	0,00	0,00		470,00	0,37	0,00
	Cota*: 490,50 m				Cota*: 473,41 m		

* Altitude no pé da barragem (cota de volume nulo) após 100 anos de depósito no respectivo reservatório.

* Altitude no pé da barragem (cota de volume nulo) após 100 anos de depósito no respectivo reservatório.

4 - CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foram estudadas as produções de sedimentos nas bacias hidrográficas dos rios: das Velhas, Paracatu e Urucuia, com o objetivo de avaliar os aportes de sedimentos afluentes aos reservatórios previstos para a regularização de vazões nestas bacias, visando o estudo de assoreamento, para a definição dos volumes mortos desses reservatórios. Foram utilizados dados da rede de estações sedimentométricas operadas pela Agência Nacional de Águas - ANA.

Os resultados permitem concluir que:

- as maiores concentrações anuais médias de sedimentos foram observadas na bacia do rio das Velhas, cujos valores variaram de 208 mg/l a 1981 mg/l, com produções específicas variando de 184,2 t/km²/dia na estação Várzea da Palma, com área de drenagem de 25.940 km² a 2.121,4 t/km²/dia na estação Honório Bicalho, com área de drenagem de 1.642 km².

- nas estações da bacia do rio das Velhas a relação entre a produção específica observada e a considerada normal pelo PNUD (1977), variou de 0,36 a 3,57, com 4 estações com produção específica acima da considerada normal. Na bacia do rio Urucuia, as duas estações estudadas apresentaram valores abaixo dos considerados normais e na bacia do rio Paracatu, onde foram estudadas 2 estações, a produção específica observada na estação de jusante, 42930000- Porto do Cavalo, está acima da considerada normal com relação 1,22. Observa-se nesse caso que a produção específica na área incremental entre a estação 42395000 - Santa Rosa e a estação 42930000 - Porto do Cavalo, 400,9 t/km²/ano, é superior à produção específica média de toda a bacia e a sua relação com a produção específica considerada normal para a área de drenagem correspondente é de 1,35.

Na bacia do rio das Velhas ocorre produção específica negativa, indicando haver deposição de sedimentos, no trecho compreendido entre as estações ponte Raul Soares (41340005) e Jequitiba (41410000) e na área incremental compreendida entre as estações 41780002 - Presidente Juscelino-Jusante, no rio Paraibuna e 416500002 - Ponte do Licínio Jusante e, a estação 41818000 - Santo Hipólito. Nos demais trechos a produção específica observada foi positiva, indicando a ocorrência de erosão.

Nas bacias dos rios Paracatu e Urucuia não foram detectados trechos onde ocorre produção específica negativa de sedimentos.

Na maioria dos reservatórios, o volume assoreado, depois de 100 anos não representou limitação à implantação dos mesmos. No reservatório Raul Soares foi sugerida a revisão da cota inicialmente projetada para a soleira do reservatório. Com a cota 670 m, só foi possível o cálculo para o tempo de assoreamento de 50 anos, indicando que o aporte de sedimentos é alto, havendo a

possibilidade de assoreamento do volume útil do reservatório em um tempo inferior a 100 anos. Foi sugerida a adoção da cota de 680 m, como o nível máximo de operação do reservatório.

Os resultados estão limitados pela qualidade dos dados disponíveis, podendo-se destacar:

1. não se dispunha de dados de granulometria do material de fundo nem do material transportado em suspensão, podendo ser aplicado somente o método de Colby (1957) para o cálculo da descarga total de material de fundo;
2. os dados disponíveis de granulometria do sedimento em suspensão, são valores médios publicados pela Eletrobrás em 1992 em 4 postos fluviométricos na bacia do rio das Velhas, 1 posto fluviométrico na bacia do rio Paracatú e 1 na bacia do rio Urucuia, o que limita os resultados de variação do peso específico dos depósitos de sedimentos

Recomenda-se que, seja feita uma análise detalhada da consistência da base de dados sedimentométricos dos rios brasileiros e que seja incluído nas medições de descargas sólidas a análise granulométrica do material em suspensão e do material do leito. Sugere-se ainda o estabelecimento de um número mínimo de estações onde seja feita a medição da descarga sólida por arraste de fundo.

5. BIBLIOGRAFIA

BORLAND, W.M. & MILLER, C.R. (1958). Distribution of Sediment in Large Reservoirs. Journal of Hydraulics Division. ASCE. V.84, n. HY-2. April, 1958.

BRUNE, G. M. - Trap Efficiency of Reservoirs. Trans. AGU, Vol. 34, N° 3, July 1953

CARVALHO, N.O. "Hidrossedimentologia Prática". CPRM-ELETROBRÁS. 1994.

CARVALHO, N.O. "The Increasing Sediment Yield in High and Medium São Francisco River Basin – Brazil". International Symposium on Debris Flow Disaster Protection. China Railway Society. Emeishan City. Sichuan. China. October. 1991.

COLBY, B.R. (1957). "Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity". Transactions, Amer. Geophy. Union, Vol. 38, n.5, oct., pp. 708-719.

ELETROBRÁS – Diagnóstico das Condições Sedimentológicas dos Principais Rios Brasileiros. Ministério de Minas e Energia. 1998.

- LANNA, A. E. L.; VIEGAS FILHO, J. S.; VIANA JR., W. P.; DAMÉ, R. C. F.; PAIVA, J. B. D. (2005). “Estudos de Avaliação da Viabilidade Sócio-Econômica e Ambiental de Implantação de um Sistema de Barragens de Regularização de Vazões das Bacias dos Rios das Velhas, Paracatu e Urucuia nos Estados de Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal”
- MILLER, C. R. – Determination of the Unit Weight of Sediment for Use in Sediment Volume Computations. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Project Planning Division, Denver, Colorado, 1953.
- PAIVA, J.B.D. ; LAGO, N. TSR - 1.0 . Software para o cálculo do transporte de sedimentos em rios. II Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Rio de Janeiro. Pp127-135. 1998.