



ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA CURVA COTA x ÁREA x VOLUME DE UM RESERVATÓRIO DE CABECEIRA

Douglas Mazeika Paulek¹; Camila Freitas²; Mônica Irion Almeida³

ABSTRACT – The area-capacity curve of a reservoir could change due to the silting process. In this paper are presented and compared the design area-capacity curve, the theoretical evaluation of the sediment inflow, and the updating of the area-capacity curve of the Foz do Areia Reservoir, in Iguaçu river, Brazil. The comparison of the two curves (design and updated) indicated a difference of 5.9% in the active storage and 6.9% in the total capacity of the reservoir. The methodology used for the theoretical evaluation of sediment inflow indicates that, in 40 years of operation, the volume filled by deposited sediment would represent a reduction of 0.68% of the active storage, which is significantly lower than that obtained in the area-capacity curve updated in 2017. However, the differences between the design curve and the one updated in 2017 should consider the difference in methodology used, also influencing the results of the theoretical evaluation. Even if it is a bedside reservoir, the sedimentation process of the Foz do Areia reservoir is slow, and the control sections installed in 2017 corroborate this conclusion, but still do not have enough data to determine the sediment distribution in the reservoir. In the case of Foz do Areia, the 10-year interval between the updating of the area-capacity curves required by Regulatory Agencies is very small, and this periodicity should be more flexible.

Palavras-Chave – Assoreamento; reservatório; curva cota x área x volume.

1 - INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo, as curvas cota x área x volume (CAV) dos reservatórios tendem a se alterar em decorrência do fenômeno do assoreamento, causado pelo aporte de sedimentos, originários de processos erosivos na bacia hidrográfica. Os sedimentos são carregados pelo rio em seu percurso, e a deposição destes ao longo do reservatório varia em função do tipo do sedimento gerado na região, do material do leito, e da morfologia do terreno.

O assoreamento de um reservatório é fator determinante de sua vida útil, indicada pelo tempo estimado em que o volume do reservatório será ocupado pelos sedimentos a ponto de perder suas funções ou inviabilizá-las economicamente (Carvalho, 2008).

1) Copel Geração e Transmissão S.A., Rua Padre Agostinho, 2600 - Bigorrião - Curitiba-PR, douglas.paulek@copel.com, (41) 3331-4604

2) Copel Geração e Transmissão S.A., Rua Padre Agostinho, 2600 - Bigorrião - Curitiba-PR, camila.freitas@copel.com, (41) 3331-4233

3) Copel Geração e Transmissão S.A., Rua Padre Agostinho, 2600 - Bigorrião - Curitiba-PR, monica.irion@copel.com, (41) 3331-3682



A presença de barragens a montante ajuda a reduzir o aporte de sedimentos nos empreendimentos a jusante. Assim, os reservatórios de cabeceira tendem a ser mais vulneráveis ao assoreamento do que os demais da cascata.

Neste contexto, a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010, de 10 de agosto de 2010, determinaram que os reservatórios das usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) tenham suas curvas CAV atualizadas pelo concessionário ou autorizado a cada dez anos de operação.

Para padronizar este monitoramento, a ANA (2013) desenvolveu um guia de “*Orientações para atualização das curvas Cota x Área x Volume*”, onde estão dispostos os procedimentos a se adotar, tanto no planejamento quanto na execução dos serviços de atualização das curvas CAV.

Em 2017 foram finalizados os levantamentos em campo para atualização da curva CAV do reservatório da UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto (GBM, originalmente denominada Foz do Areia) em atendimento à Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010. Este é o primeiro reservatório da cascata do rio Iguaçu, drenando 29.900 km² (o que representa mais de 40% da área da bacia do rio Iguaçu). Sua área inundada (no nível máximo normal, 742 m) é 139,5 km², e iniciou sua operação em 1980. A Figura 1 (próxima página) apresenta sua localização em relação aos demais reservatórios da cascata, além de um resumo dos seus volumes (útil, morto e total).

2 - CURVAS COTA X ÁREA X VOLUME E ESTUDOS DE APORTE DE SEDIMENTO

Na análise da evolução da curva CAV da UHE GBM, foram considerados os estudos a seguir:

2.1 - Curva CAV original do reservatório de Foz do Areia

A curva CAV original do reservatório da UHE GBM foi gerada durante o projeto do empreendimento, elaborado pelo consórcio formado pelas empresas Milder-Kaiser Engenharia e Kaiser Engineers International Corporation (1975).

Para elaboração dos mapas topográficos da área do reservatório, foi utilizada a restituição aerofotogramétrica em escala 1:20.000 realizada pela Copel, a partir de levantamento aerofotográfico aéreo em escala 1:70.000 feito em 1962 pelo Departamento de Geografia, Terras e Cartografia do Paraná (DGTC), e apoiada em triangulações de segunda ordem. Os mapas resultantes apresentavam curvas de nível com intervalos de cinco metros, e estavam referenciados ao sistema do Conselho Nacional de Geografia.

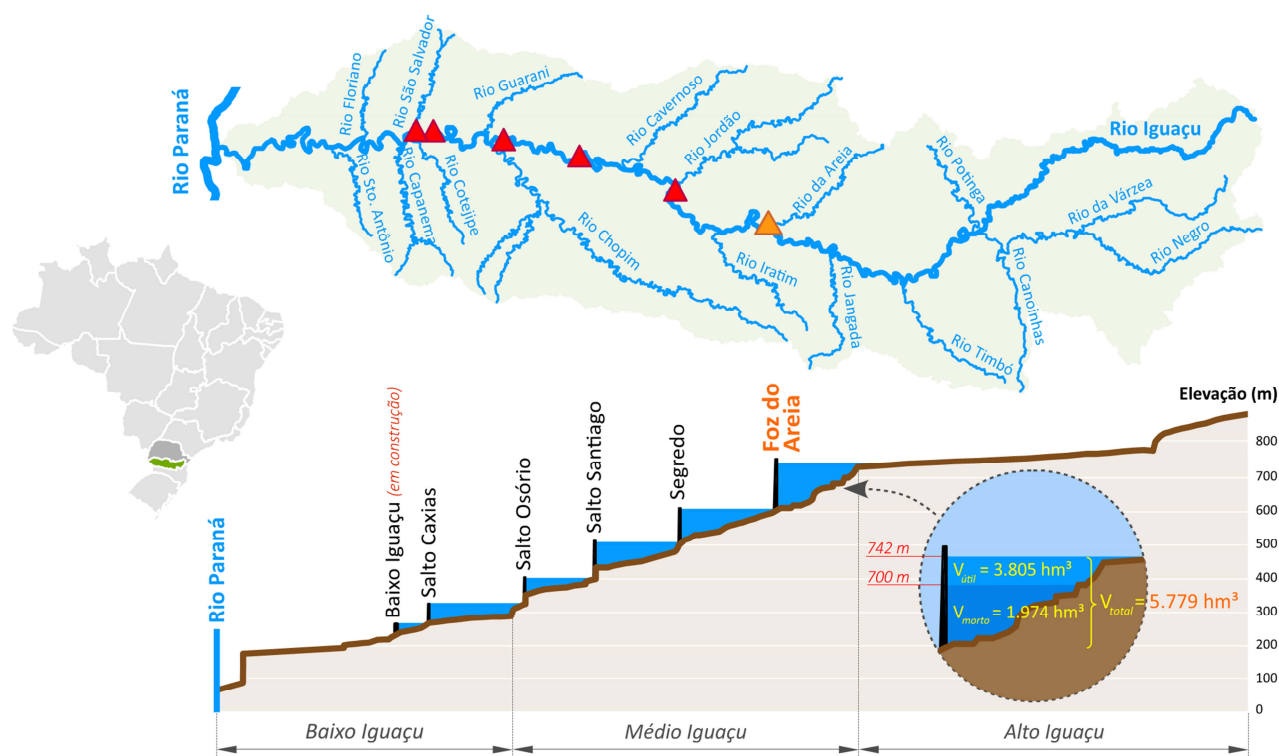


Figura 1 – Mapa da bacia e perfil de quedas do rio Iguaçu (sem escala; adaptado de Intertechne, 2013)

Posteriormente, em 1974 foi realizado um nivelamento geométrico ao longo do rio Iguaçu, a fim de se obter valores altimétricos coerentes com os demais empreendimentos em implantação na bacia.

Em 2015 foi realizado controle de qualidade no material cartográfico que deu origem à CAV de projeto, com o objetivo de avaliar sua utilização na atualização da curva CAV em atendimento à Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010. De acordo com esta análise, o material não atendia aos critérios estatísticos do Padrão de Exatidão Cartográfica mínimo estabelecido pela ANA (2013).

2.2 - Avaliação teórica do assoreamento do reservatório de Foz do Areia

Entre 2010 e 2011 foi realizada pela Copel GeT uma avaliação teórica do aporte de sedimentos e da evolução do assoreamento nos reservatórios de Foz do Areia e Segredo (Copel GeT, 2011). A metodologia deste estudo foi apresentada em 2011 por Sugai *et al.* (2010) no XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, descrevendo o procedimento com maiores detalhes.

O estudo foi baseado em uma série de dados de transporte de sólidos em suspensão entre 1976 e 2010, observados em sete estações sedimentométricas, listadas na Tabela 1. Devido às características físicas da bacia, à localização das estações e à localização da UHE GBM em relação à

UHE Governador Ney Aminthas de Barros Braga (Segredo), a região de estudo foi dividida em três sub-trechos, onde foram definidas curvas-chave de sedimentos.

Tabela 1 – Estações utilizadas na avaliação teórica do assoreamento (fonte: Copel GeT, 2011)

Sub-trecho	Código ANA	Nome da Estação	Rio	Área de Drenagem (km ²)
Montante de União da Vitória	65310000	União da Vitória	Iguaçu	24.200
	65365000	Porto Vitória	Espingarda	165
Incremental	65370000	Jangada do Sul	Jangada	1.060
União da Vitória – Foz do Areia	65415000	Fazenda Maracanã	Palmital	323
	65764000	Madeira Gavazzoni	da Areia	1.010
Incremental	65825000	Santa Clara	Jordão	3.910
Foz do Areia – Segredo	65960000	Águas do Verê	Chopim	6.700

Utilizando estas curvas, foram calculadas as descargas sólidas médias anuais, a partir de séries de vazões líquidas médias diárias entre abril de 1968 e dezembro de 2009, obtendo um aporte de sedimentos de 2.079.345 t/ano para a UHE GBM.

Na sequência, foi avaliada a eficiência de retenção e o peso do sedimento em função do tempo, chegando a um assoreamento estimado de 162 hm³ em 100 anos de operação (o que representa 2,80% de seu volume total).

Para a avaliação da distribuição dos sedimentos no processo de assoreamento do reservatório, foi utilizado o “método empírico de redução de área” de Borland & Miller, que leva em consideração o formato do reservatório para estimar a porcentagem de sedimentos ao longo do leito (Carvalho, 2008).

Foram obtidas as CAV revisadas para 30 e 100 anos de operação, utilizando a distribuição dos sedimentos calculada pelo método de Borland & Miller. Estimou-se o tempo para o assoreamento do volume morto do reservatório em 620 anos e do volume total em 3.780 anos.

2.3 - Atualização da curva CAV do reservatório de Foz do Areia

Para atendimento à Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010, a Copel GeT contratou o estudo de atualização da curva CAV da UHE GBM no ano de 2017. De acordo com as Orientações da ANA (2013), o reservatório foi enquadrado na tipologia A, devido à alta criticidade quanto ao assoreamento e à inviabilidade de uso da cartografia de projeto (Copel GeT, 2014). O trabalho foi realizado pela empresa Rural Tech (2017) e consistiu em:

- **Implantação da rede de Vértices Geodésicos – RVG:** composta por 13 vértices;



- **Avaliação da aplicabilidade do MapGeo 2015:** apresentou a qualidade mínima exigida no documento orientativo da ANA;
- **Maapeamento da área molhada:** por ensonificação do leito com sonar multifeixe;
- **Maapeamento da área seca:** utilizado o modelo digital de terreno resultante de levantamento aerofotogramétrico realizado em 2012 pela empresa Fototerra;
- **Geração do Modelo Digital de Terreno (MDT):** grid de pontos, com resolução de 2 m;
- **Cálculo da CAV:** geoprocessamento do MDT.

O volume total do reservatório em seu nível d'água máximo normal resultou em 5.447,32 hm³ (5,9% menor que o da curva CAV de projeto), e o volume morto (abaixo do nível d'água mínimo normal) resultou em 1.838,06 hm³ (6,9% menor que o de projeto).

2.4 - Série de perfis transversais das seções de controle do assoreamento

Em 2017 foram instalados três conjuntos de seções de controle para monitoramento anual do assoreamento. Cada conjunto conta com três seções topobatimétricas espaçadas entre si em cerca de cinco vezes a largura natural dos rios Iguaçu e da Areia na região. A localização destas seções está indicada na Figura 2.

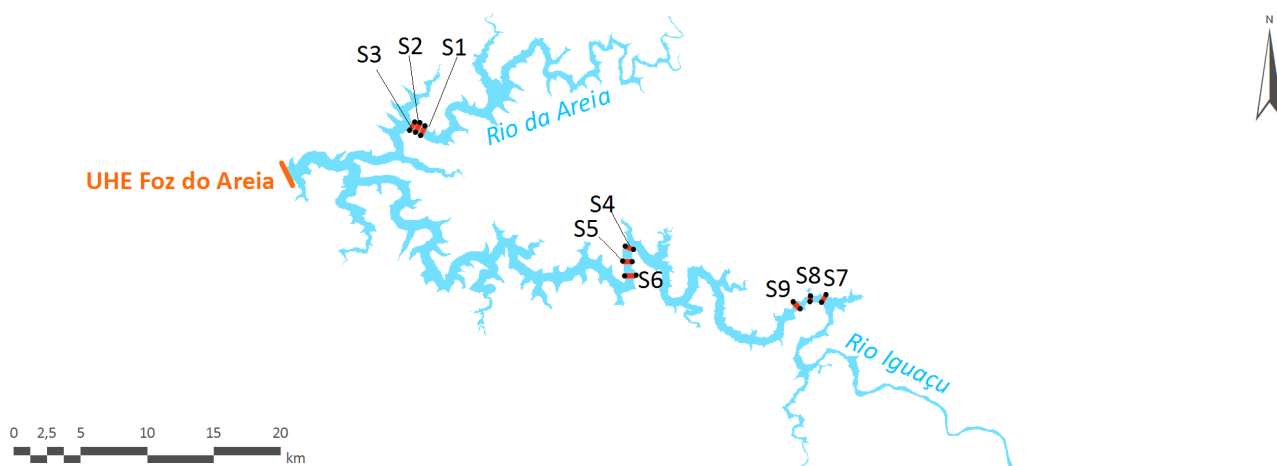


Figura 2 – Localização das seções de controle no reservatório da UHE GBM (adaptado de Ruraltech, 2017)

O primeiro levantamento de perfis transversais nestas seções ocorreu em 2017, realizado pela empresa Rural Tech na ocasião da atualização das curvas CAV, por meio da intersecção das seções topobatimétricas no MDT. Em 2018 foi realizado novo levantamento das seções utilizando um ecobatímetro monofeixe para determinação das profundidades (Água e Solo, 2018).

A Tabela 2 apresenta a comparação entre estes dois levantamentos, onde pode se observar que os perfis não sofreram alterações significativas no período, indicando que o intervalo de um ano entre os levantamentos tende a ser muito pequeno.

Tabela 2 – Diferenças entre as seções levantadas em 2017 e 2018

Seção	Área (m ²)		Diferença 2018/2017	Seção	Área (m ²)		Diferença 2018/2017
	2017	2018			2017	2018	
S1	464123,39	463019,81	-0,24%	S6	444745,38	425927,92	-4,23%
S2	437227,56	435586,09	-0,38%	S7	185448,81	184729,05	-0,39%
S3	430642,76	433284,18	0,61%	S8	127444,51	127340,42	-0,08%
S4	329086,28	329945,41	0,26%	S9	161600,22	169053,58	4,61%
S5	303646,54	309540,93	1,94%	Diferença média =		0,23%	

Apenas duas seções (S6 e S9) apresentaram diferenças de maior ordem, mas foi possível verificar na análise gráfica que se tratavam de diferenças entre as metodologias e equipamentos utilizados em cada levantamento.

Também é importante salientar que no período entre estes levantamentos não ocorreu nenhum grande evento de cheia a montante do reservatório.

Quando houver uma série maior de levantamentos destas seções, será possível avaliar com maior segurança o processo de assoreamento nestes três trechos do reservatório da UHE GBM.

3 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS ESTUDOS DE ASSOREAMENTO E CURVAS CAV

Na Figura 3 (próxima página) são apresentadas as curvas CAV definidas: no estudo original (curva de projeto, de 1975), na avaliação teórica de 2011 pelo método de Borland & Miller para o período de 40 anos (mais próxima ao tempo de operação atual) – que ficou muito próxima da de projeto, dificultando sua visualização no gráfico – e na atualização realizada em 2017 em atendimento à Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010.

A avaliação teórica do assoreamento indicou que, em 40 anos, cerca de 0,68% do volume no nível d'água máximo normal (cota 742 m) estaria assoreado. Já a diferença entre o volume de projeto e o da atualização da CAV em 2017 chegou a 5,7% para a mesma cota, porém este valor não representa diretamente o volume assoreado no período de operação do reservatório.

A diferença entre a curva CAV de projeto e a atualizada em 2017 “pode ser justificada em função das diferenças metodológicas entre o levantamento [mais] atual, realizado com tecnologia multifeixe aliado a aerofotogrametria, e o levantamento realizado na época do projeto” (Rural Tech, 2017). O fato da cartografia de projeto não ter atendido os critérios estatísticos do Padrão de Exatidão Cartográfica estabelecido no documento orientativo da ANA (2013) corrobora com esta justificativa.

Com relação à distribuição dos sedimentos no reservatório, não é possível chegar a uma conclusão baseada apenas na comparação destas três curvas CAV.

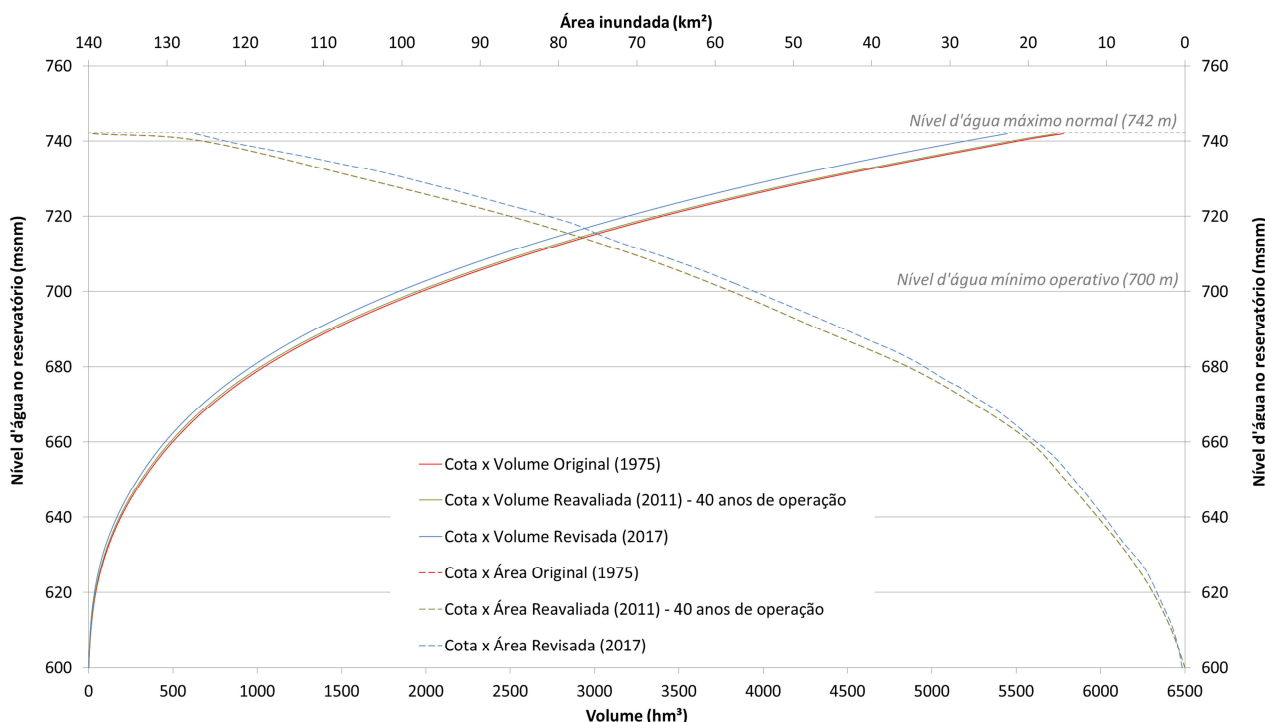


Figura 3 – Comparação entre as curvas CAV do reservatório de Foz do Areia: projeto (1975), avaliação teórica (2011) e atualização (2017)

4 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

Embora seja inevitável que o volume do reservatório da UHE GBM tenha uma redução nestes quase 40 anos de operação, a diferença de volumes entre a curva CAV de projeto e a atualizada em 2017 não pode ser considerada apenas como a representação do volume assoreado. A metodologia empregada na elaboração do projeto em 1975 e a da atualização em 2017 resulta em curvas CAV diferentes, principalmente quando se leva em conta a precisão dos levantamentos disponíveis na época do projeto, muito inferiores aos encontrados hoje.

Ainda que a avaliação teórica realizada em 2011 tenha resultado em volumes assoreados muito inferiores à diferença entre as curvas CAV de projeto e a atualizada em 2017, sua aplicação ainda se mostra viável, pois, embora numericamente a diferença pareça grande, ao se levar em conta a diferença da metodologia de obtenção das duas curvas, o método de Borland & Miller apresentou uma tendência de velocidade muito baixa do processo de assoreamento. Caso as duas curvas CAV (de projeto e atualizada) fossem obtidas a partir da mesma metodologia, possivelmente os valores numéricos seriam bem mais próximos.

A Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010 prevê a atualização das curvas CAV a cada dez anos para os reservatórios de usinas despachadas pelo ONS. Observando o caso do reservatório da UHE GBM, onde este artigo da Resolução é aplicável, a análise das duas curvas CAV demonstra que o processo de assoreamento neste reservatório é lento. Há de se ponderar ainda que é



realizado o monitoramento hidrossedimentológico em diversos postos da bacia hidrográfica, monitoramento nas seções de controle, e que há a possibilidade de aplicação de métodos de avaliação teórica do assoreamento. Em casos opostos, nos quais o processo de assoreamento é bastante acelerado, dez anos pode ser um intervalo muito longo entre uma atualização e outra.

Desta forma, é recomendável que, em uma revisão da Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010 e de seus documentos orientativos, sejam consideradas as características de cada reservatório para a definição da periodicidade da atualização das curvas CAV, serviço bastante oneroso para os Agentes do Setor Elétrico e, conseqüentemente, para a sociedade em geral.

BIBLIOGRAFIA

AGUA E SOLO ESTUDOS E PROJETOS (2018). Relatório de Levantamento de Seção Topobatimétrica de Controle Hidrossedimentológico da UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto. Porto Alegre. 10 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2010). Resolução Conjunta ANA ANEEL nº 03/2010, de 10 de agosto de 2010. Brasília.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2013). Orientações para atualização das curvas Cota x Área x Volume. Brasília. 39 p.

CARVALHO, N. O. (2008). Hidrossedimentologia Prática -2ª ed., atualizada e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência. 599 p.

COPEL GeT – COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO. DRHI – DEPARTAMENTO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS (2011). Reavaliação do assoreamento nos reservatórios das usinas hidrelétricas de Foz do Areia (UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto) e Segredo (UHE Governador Ney Braga) – Relatório DRHI 041/11. Revisão 1. Curitiba. 22 p.

COPEL GeT – COPEL GERAÇÃO E TRANSMISSÃO. VRHI – DIVISÃO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS (2014). UHE Foz do Areia - Plano de trabalho para atualização da curva Cota x Área x Volume – Relatório VRHI nº 002/14. Curitiba. 13 p.

INTERTECHNE CONSULTORES (2013). UHE Baixo Iguaçu – Projeto Básico. Curitiba.

MILDER-KAISER ENGENHARIA; KAISER ENGINEERS INTERNATIONAL CORPORATION (1975). Usina Hidrelétrica Foz do Areia – Relatório do Projeto Básico.

RURAL TECH COMÉRCIO E SERVIÇOS (2017). UHE Foz do Areia – Relatório Técnico – Atualização das Curvas Cota x Área x Volume. Brasília. 33 p.

SUGAI, M. R. von B.; ALMEIDA, M. I.; PAULEK, D. M. (2010). Atualização das curvas Cota x Área x Volume utilizando o método empírico de Borland & Miller – Aplicação ao Reservatório de Foz do Areia. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió: ABRH. 13 p.