www.so-hybam.org

6-10.nov.2017

UFF – Niterói, RJ

7th HYBAM scientific meeting
Large Tropical Rivers
Under Climate and Land Use Changes

MEDIÇÕES HIDROSSEDIMENTOMÉTRICAS

MEDIÇÕES HIDROSSEDIMENTRICAS NO RIO MADEIRA – DADOS, CONSISTÊNCIA E USOS

Informações baseadas em trabalhos antecedentes realizados em conjunto por

Newton de Oliveira **CARVALHO** - **PCE**
Ulmar Manoel **DUARTE** - **PCE**
Maximiliano Andrés **STRASSER** - **PCE**
Fernanda Biancardini Rocha **MARQUES** - **PCE**
Natália Barroso **FERES** - **PCE**
Ruy Ferrreira **LOPES** - **PCE**
Luiz Fernando **ALVES** da Silva - **Furnas**
Neiva da Conceição Pereira de **RUIZ** - **Furnas**

FINALIDADE DESTA APRESENTAÇÃO

-Comentários sobre medições hidrossedimentométricas para estudos de interesse de aproveitamentos hidrelétricos no rio Madeira.

-Análise de consistência dos dados

-Uso dos dados em estudos de viabilidade e projeto básico e operação:

1) **Medições de vazão e de sedimento fluvial**
2) **Avaliação de assoreamento dos reservatórios e da vida útil,**
3) **Estudos do remanso considerando o depósito de sedimento,**
4) **Estudos de efeitos no canal de jusante da barragem,**
5) **Procura de mitigação dos efeitos,**
6) **Atender questionamentos de entidades como a ANA, ANEEL e IBAMA,**
7) **Permitir o acompanhamento de alterações no comportamento sedimentológico antes e após a implantação do aproveitamento.**

Em 2003 os estudos de inventário de locais de barragens no rio Madeira, assumido por Furnas Centrais Hidrelétricas, estava concluído e submetido à aprovação da ANEEL.

O inventário aprovado previu a construção das UHE's Jirau e Santo Antônio. A geração total de energia ficaria em torno de 7.000 MW.

A Odebrecht se associou a Furnas no interesse de construir as usinas.

A PCE, Projetos e Consultoria de Engenharia, foi contratada para os estudos de viabilidade, projeto básico e acompanhamento de obras. Uma vez construídas as barragens, ficou sendo contratada para operação da rede hidrossedimentométrica.

Os dados de vazão e de sedimentos para o inventário foram obtidos do Banco de Dados do DNAEE e ANA cujos dados de sedimentos fluviais eram só de concentração de sedimentos em suspensão.

Para os estudos de assoreamento dos reservatórios havia necessidade de obtenção da descarga sólida total e de granulometria dos sedimentos.

Furnas assumiu as medições de 2003 a 2005, ficando a PCE com a operação após os estudos de viabilidade.

Fui indicado como Consultor desde o início do trabalho de Hidrossedimentometria,

MEDIÇÕES DE VAZÃO E AMOSTRAGEM DE SEDIMENTO

Foi usado o molinete para as medições de descarga líquida, com 20 a 25 verticais ao longo da seção. No caso de níveis médios e baixos eram obtidos diversos pontos de medida da velocidade por vertical, enquanto em níveis altos somente em 2 ou 3 pontos, devido grandes profundidades e altas velocidades,

No período de 2003-2007 foram realizadas algumas medições com o ADCP. A partir de 2008 esse equipamento passou a ser utilizado em todas as medições, junto com o molinete.

As amostragens de sedimentos foram realizadas pelo método de IIL, igual incremento de largura por integração na vertical, em 12 a 15 verticais, com uso de equipamentos da série norte-americana fabricados no País.

As medições de vazão e de sedimento, foram iniciadas em novembro de 2003 com equipes da PCE e de FURNAS, logo após os estudos de inventário.

As medições da 1ª fase foram realizadas no

Rio Mamoré em Guajará-Mirim,
Rio Madeira em Abunã
Rio Madeira em Porto Velho.

Para a 2ª fase, após a viabilidade, a rede hidrométrica básica foi ampliada:

Rio Madeira em Cujubim,
Rio Madeira em São Carlos,
Rio Madeira em Papagaio
Rio Madeira em Humaitá,
No afluente Jaci-Paraná,

O posto de Cujubim foi desativado pela proximidade com Porto Velho e São Carlos. A operação ficou por conta da PCE, tendo sido instalado Laboratório de Análises em Porto Velho. Com a construção da barragem de Santo Antônio, o local de Abunã foi inundado, sendo que as medições passaram a ser realizadas em Cachoeira do Inferno.

PRINCIPAIS PROBLEMAS SEDIMENTOLÓGICOS NA BACIA DO RIO MADEIRA:

Alta carga sólida proveniente da formação geológica Andina, região de relevo muito movimentado, com solos erodíveis, fortes precipitações e outros fatores, inclusive ação humana por queimadas, desflorestamento para agricultura e pecuária.

A carga sólida derivada da região Andina corresponde a somente 12% da área da bacia. As partículas transportadas no leito vão se quebrando ao longo do trajeto, chegando ao Madeira, no Brasil, constando na sua maior parte de material muito fino, como argila e silte.

A carga sólida do Madeira é igual ou mesmo superior à do Amazonas na confluência dos dois rios, embora a vazão seja três vezes menor

REGIME: **ano hidrológico de 1º de Outubro a 30 de Setembro Maiores níveis de março a abril, e menores de setembro a início de outubro**

AHEs em construção: Jirau 972.710 km^2 (local de estudo por Furnas) e Santo Antônio 988.873 km^2

DADOS de SEDIMENTOS DISPONÍVEIS NO HIDROWEB:

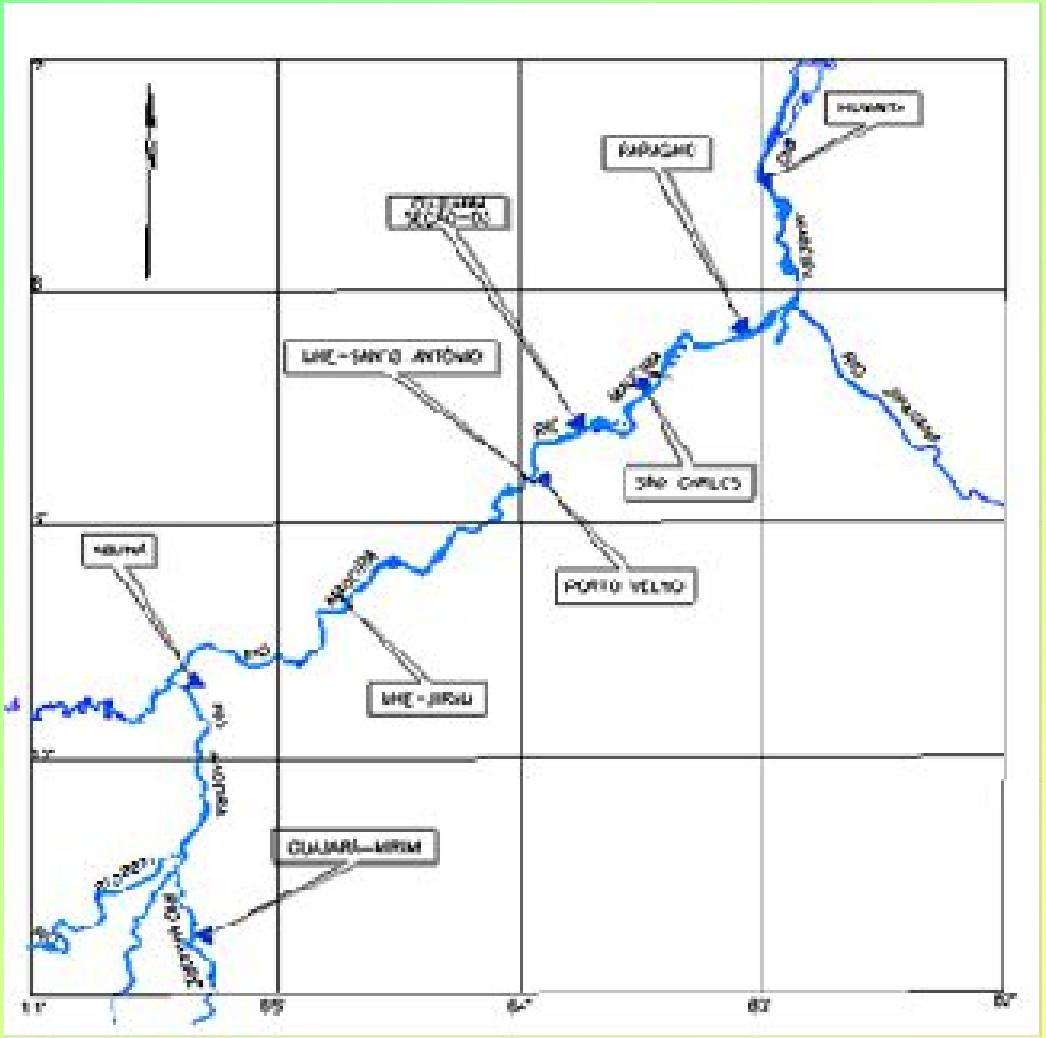
ANA/CPRM com medições de descarga em suspensão em 13 postos desde 1978 com determinação da concentração e vazão

De Nov.2003 a Jan.2007 as medições ficaram a cargo de Furnas e Odebrecht com assistência da PCE

Atualmente são realizadas medições regulares em seis postos pela PCE em contrato com Santo Antônio Energia.

A Construserv opera no Madeira e afluentes em 12 postos, para estudos de JIRAU.

Rio	Local	Data da instalação	Área de drenagem (km²)	Entidade opera-dora *	Início de medição de sedimentos **	Início de med. Por Furnas/CNO ***
Mamoré	Guajará-Mirim	Jun.1972	589.497	ANA	Ago.1984	Nov.2003
Madeira	Abunã	Fev.1976	899.761	ANA	3 medições- 1984	Nov.2003
Madeira	Porto Velho	Abr.1967	988.997	ANA	Out.1978	Nov.2003



Imagens do Google

Fig. 23 - Imagem Google da barragem de Santo Antônio

Fig. 24 - Imagem Google da Barragem do Jirau

OPERAÇÃO DOS POSTOS -Frequência semanal de medições de 2003 a 2005, quinzenal de Mai/2005 a Jan/2007, sendo atualmente a cada dois meses

-Observação diária de níveis d'água às 7 e 17 hs.

- Análises das amostras em Laboratório de FURNAS, em Goiânia, por pipetagem e tubo de remoção pela base para material fino em suspensão, e peneiramento para material mais grosso. A PCE instalou Laboratório em Porto Velho as análises em 2008. Esses trabalhos foram facilitados por planilhas preparadas antes pela CESP durante programa de trabalho que participou o mesmo consultor.

- Descarga Sólida Total é calculada pelo método modificado de Einstein (USGS/USBR) utilizando o programa "Einstein.xls" do Eng. Anderson Braga Mendes, da Eletrobrás (hoje em Itaipu).

-Também é utilizado o programa SEDIM, da Profª Mônica da Hora, da UFF, com 14 fórmulas para descarga de arrasto e material do leito segundo o critério do USGS e USBR.

CÁLCULO DA DESCARGA TOTAL DE SEDIMENTOS - CÁLCULO DOS Z's SEGUNDO LARA

Rio:	**Tocantins**	Local:	**Marabá**		Calculado por: **Anderson Braga**
Data:	**25/04/2000**	Medição sólida nº:	**1**	Amostradores: **AMS-8 e caçamba**	Conferido por: **Newton Carvalho**
Entidade:		Medição líquida nº:	**1**	Molinete nº:	Data: **18/03/2002**
Código:					

Dados:

Q: **25661,967 m³/s**	L: **1933,880 m**	V_k: **0,000000850 m/s²**			
v: **1,298 m/s**	A: **19770,060 m²**	D_{35}: **0,310 mm**			
p: **8,875 m**	T: **28,50 °C**	D_{65}: **0,480 mm**			
p_s: **10,600 m**	p_n: **0,320 m**	Concentr.: **34,200 ppm**			
		Q_{sm}: **75828,033 t/d**			

Resultados das equações:

$(RS)^{1/2}$: **0,01312**	P: **13,552**	Z_{ref} ~~~	
u'_x: **0,04109**	A': **0,030**	p': **4,438**	
delta: **0,00024**	A_r: **0,000080**	86.400 w: **167087232**	
K_s/delta: **2,00017**	Porcentagem de escoamento na zona amostreada: **98,7 %**		
x: **1,373**	Descarga em suspensão total na zona amostreada: **74856,790 t/d**		

CÁLCULO DE $i_f Q_f$								CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA TOTAL													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Tamanho dos grãos (mm)	D (mm)	*psi*	*fi*	$5.33 \times D^{3/2} \times 10^{-6}$	i_f (%)	$i_f q_f \times 10^{-6}$ (kg/s.m)	$i_f Q_f$ (t/d)	i_s (%)	Q'$_s$	V_s (cm/s)	Z'	A" $\times 10^{-3}$	J'_1	J'_2	J''_1	J''_2	(PJ"1+J"2) / (PJ'1+J'2)	I''_1	I''_2	$PI''_1+I''_2+1$	Descarga sólida total (t/d)
0.000-0.0156	0,0056			0,0706				51,00	38177,0	0,003	0,067	0,001	0,965	-0,937	1,007	-1,125	1,032	6,9E+04	-7,7E+04	8,6E+05	39400,963
0.0156-0.0625	0,0312			0,9289				30,60	22906,2	0,138	0,286	0,007	1,033	-1,280	1,149	-1,847	1,078	1,2E+03	-1,9E+03	1,4E+04	24699,575
0.002-0.0625	0,0110			0,1945				81,60	61083,1	0,012	0,110	0,002	0,969	0,991	1,020	1,222	1,038	2,1E+04	-2,6E+04	2,7E+05	63410,861
0.0625-0.125	0,0884	2,972	1,834	4,4300	1,20	0,10	16,3	10,60	7934,8	0,766	0,556	0,020	1,300	-2,047	1,763	-4,632	1,237	4,7E+01	-1,2E+02	5,1E+02	9812,166
0.125-0.250	0,1770	2,972	1,834	12,551	20,80	4,79	799,9	1,80	1347,4	2,335	0,856	0,040	2,0E+00	-3,8E+00	4,6E+00	-2,1E+01	1,8E+00	4,312	-19,675	39,764	31808,617
0.250-0.500	0,3540	2,972	1,834	35,500	45,00	29,30	4894,9	4,00	2994,3	5,340	1,180	0,080	3,6E+00	-8,1E+00	2,4E+01	-1,6E+02	4,3E+00	0,962	-6,181	7,861	38478,900
0.500-1.000	0,7070	2,972	1,834	100,20	22,00	40,42	6754,3	2,00	1497,1	11,984	1,615	0,159	9,7E+00	-2,5E+01	3,6E+02	-2,6E+03	2,1E+01	0,357	-2,598	3,239	21874,441
1.000-2.000	1,4100	5,407	0,556	282,20	9,00	14,13	2361,3			24,610	2,134	0,318	3,8E+01	-1,1E+02	8,3E+03	-6,0E+04	1,3E+02	0,192	-1,385	2,221	5243,472
2.000-4.000	2,8300	10,852	0,064	802,43	0,50	0,26	42,8			46,820	2,739	0,638	2,1E+02	-6,4E+02	2,1E+05	-1,4E+06	6,3E+02	0,124	-0,844	1,841	78,782
4.000-8.000	5,6600	21,704	0,002	2269,6	1,50	0,05	8,6			86,575	3,477	1,275	2,0E+03	-6,3E+03	5,9E+06	-3,7E+07	2,1E+03	0,087	-0,545	1,634	14,011
8.000-16.000	11,320			6419,4						153,688	4,344	2,551	3,1E+04	-9,9E+04	1,4E+08	-7,9E+08	3,5E+03	0,064	-0,365	1,506	
TOTAL	-	-	-	-	100,00	89,04	14878,1	100,00	74856,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**171410,928**

Réguas em Porto Velho e em Abunã

Barco utilizado nas medições de vazão e amostragem de sedimentos

GRANULOMETRIA DOS SEDIMENTOS:

A granulometria foi obtida para cálculos das massas específicas aparentes dos depósitos nos reservatórios. Ficou indicado que a quantidade de argila e silte é predominante no material em suspensão e de areia no material do leito.

Sedimentos (%)	Em suspensão			Do leito			
	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	Pedreg
Mamoré em Guajará-Mirim	27,43	64,19	8,38	4,09	12,89	80,51	2,51
Madeira em Abunã	25,20	63,14	11,66	0,67	6,87	92,21	0,25
Madeira em Porto Velho	26,22	62,90	10,88	1,62	8,65	89,22	0,51

Composição do sedimento em suspensão com leito					
	% Qssmed	% Qsml	Argila	Silte	Areia
Mamoré em Guajará-Mirim	80,01	19,99	**22,76**	**53,94**	**23,30**
Madeira em Abunã	92,90	7,10	**23,46**	**59,15**	**17,39**
Madeira em Porto Velho	94,19	5,81	**24,79**	**59,75**	**15,46**

LABORATÓRIOS PARA ANÁLISE DE SEDIMENTOS

Fotos 1 e 2 - Peneiras de θ 5,0 e de 25cm para granulometria de amostras em suspensão e do leito;

Fotos 3 e 4 - Dois tipos de instalação do tubo de remoção pela base; o 1º na PCE e o 2º na Construserv

Foto 5 - Pipetagem em amostra em suspensão, uso em tanque com temperatura controlada, Lab da PCE.

A operação hidrométrica seguiu normas da ANA e da OMM, estando de acordo com critérios de entidades dos EUA.

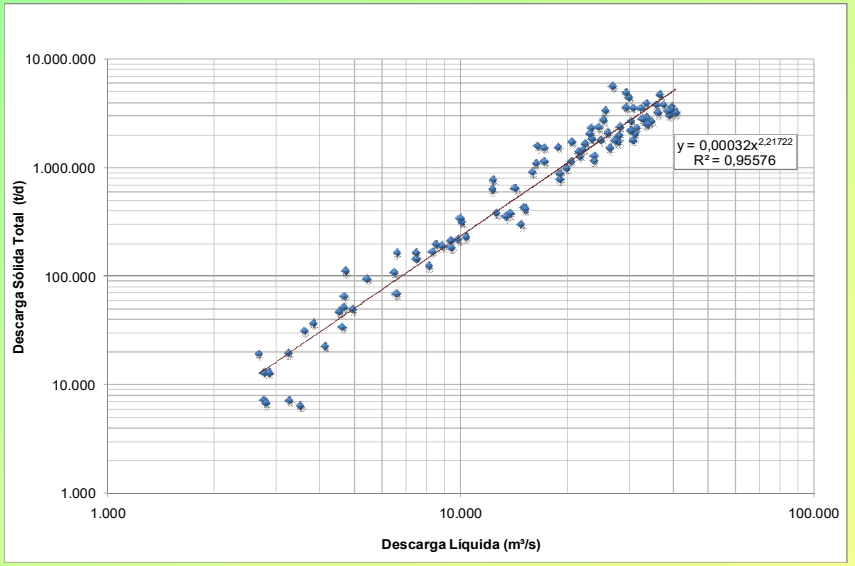
CURVAS-CHAVE DE SEDIMENTO

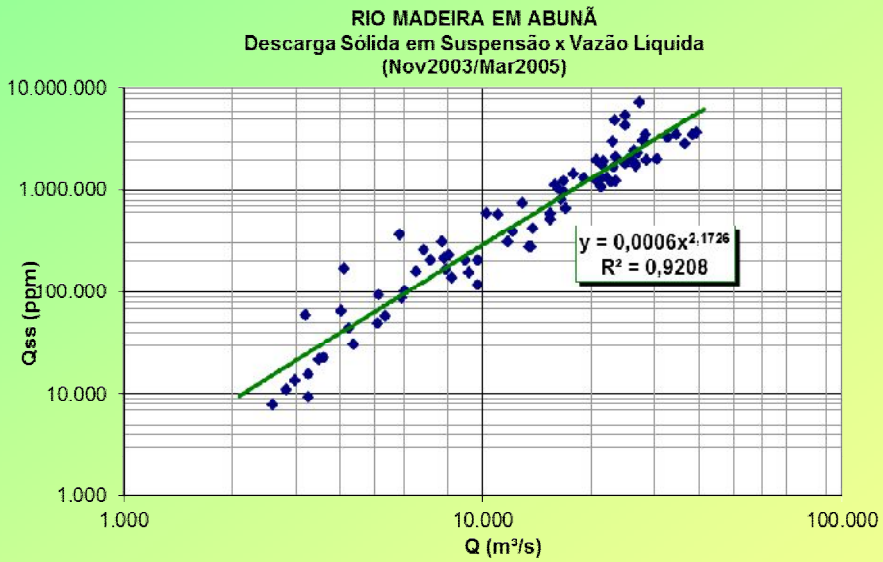
→**MADEIRA EM PORTO VELHO**

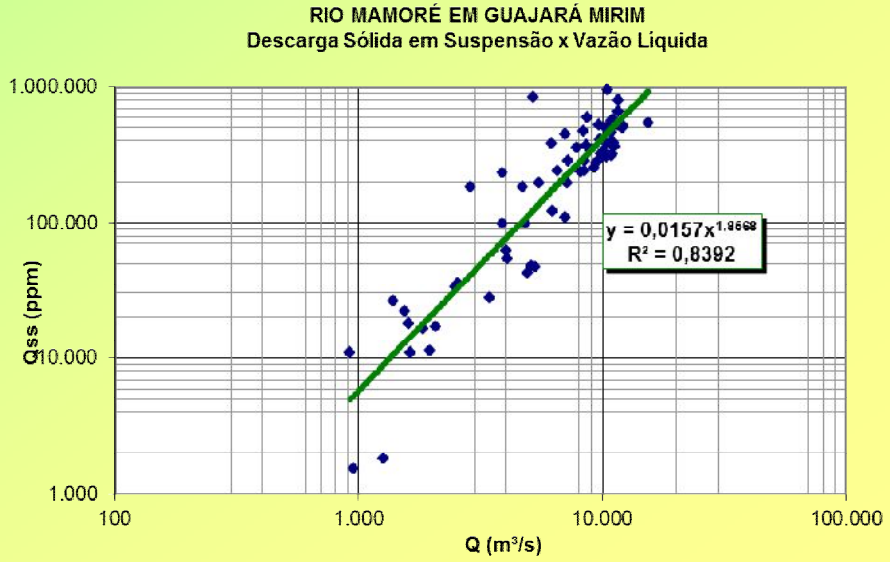
→**MADEIRA EM ABUNÃ**

→**MAMORÉ EM GUAJARÁ-MIRIM**

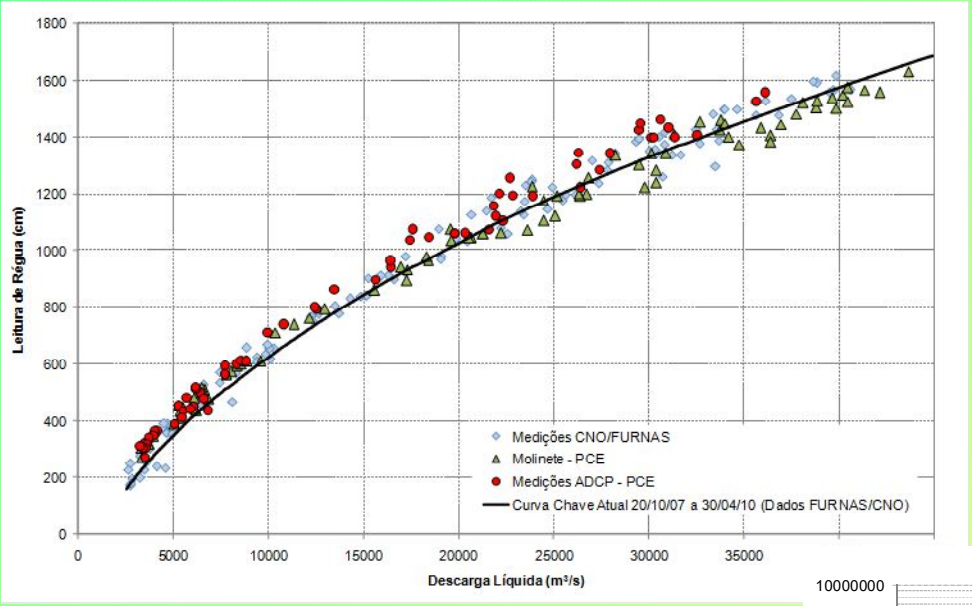
Pode-se observar a boa qualidade das curvas e, portanto, das medições





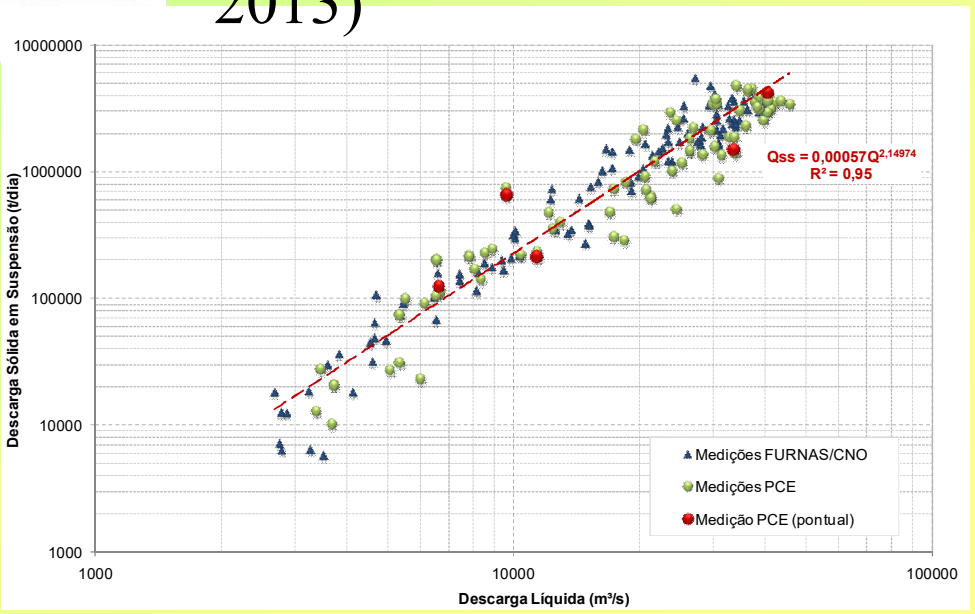


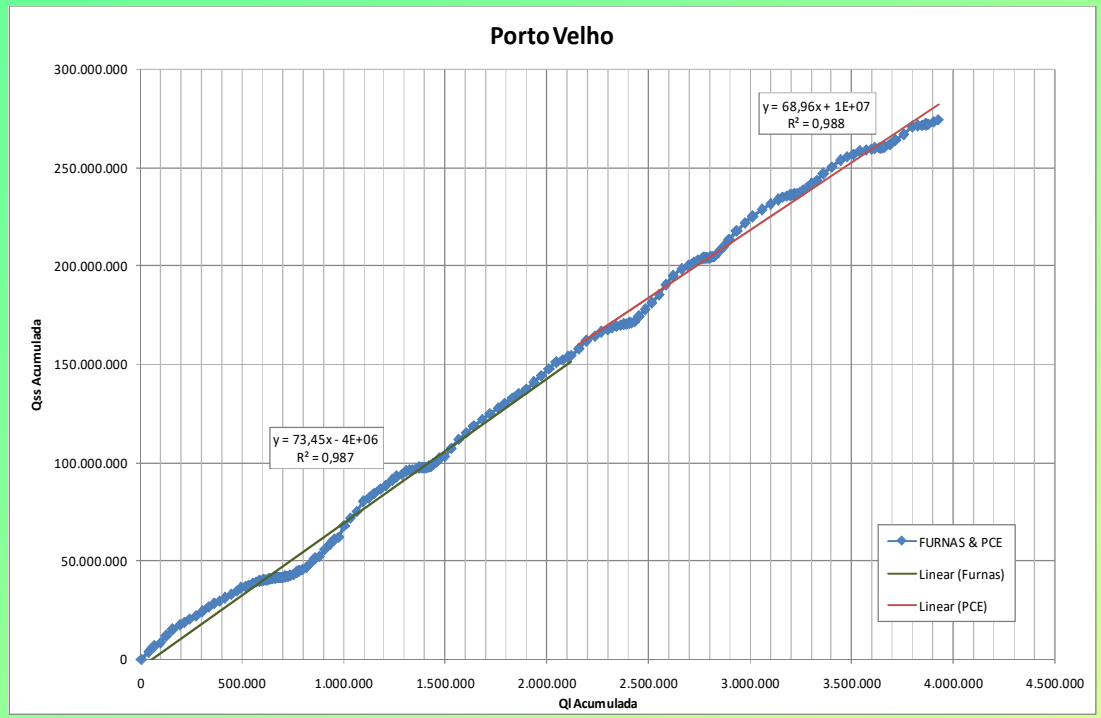
CURVAS-CHAVE DO MADEIRA EM PORTO VELHO – atualizadas



descarga líquida do rio Madeira em Porto Velho - período 2003-2007 e 2009-2013, com inclusão de novas medições (PCE, 2013)

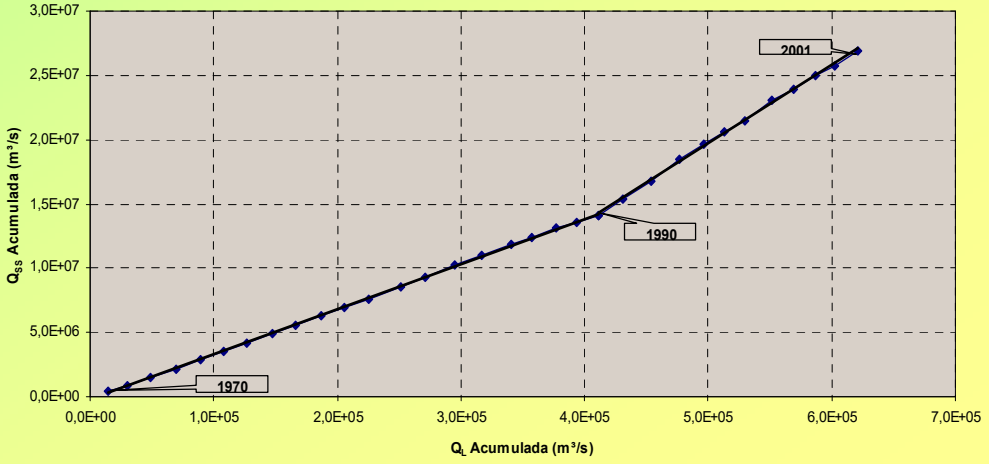
sedimentos do rio Madeira em Porto Velho – período 2003-2007 e 2009-2013 (PCE, 2013)





Rio Madeira em Porto Velho, curva de massa mostrando consistência de medições

Rio Madeira em Porto Velho, aumento da produção de sedimentos com o tempo (dados do Hidroweb).



Alguns resultados obtidos das medições do período de 2003 a 2010

	Rio Mamoré em Guajará-Mirim		Rio Madeira em Abunã		Rio Madeira em Porto Velho	
Área de drenagem (km^2)	589.497		899.761		988.997	
Vazão média ($m^3.s^{-1}$)	8.188	1971-2007	18.323	1977-2007	18.636	1967-2006
					19.299	1977-2007
Maior vazão medida ($m^3.s^{-1}$)	15.395	5.4.2006	39.261	23.2.2006	40.584	15.3.2006
Menor vazão medida ($m^3.s^{-1}$)	793	8.10.2004	2.995	30.9.2005	2.678	5.10.2004
Descarga em suspensão média diária ($t.d^{-1}$)	345.177	1971-2007	1.459.313	1978-2007	1.364.615	1967-2006
					1.487.237	1977-2007
Maior descarga em suspensão medida ($t.d^{-1}$)	850.876	19.4.2006	4.835.337	18.2.2005	5.488.652	21.2.2005
Menor descarga em suspensão medida ($t.d^{-1}$)	320	8.10.2004	5.802	22.9.2005	5.801	14.10.2005
Concentração média em suspensão ($mg.l^{-1}$)	488	1971-2007	921,8	1977-2007	848	1967-2006
Maior concentração medida ($mg.l^{-1}$)	876	23.2.2005	2.051	18.2.2005	2.352	21.2.2005
Menor concentração medida ($mg.l^{-1}$)	4,80	8.10.2004	22,9	22.9.2005	19,1	14.10.2005
Descarga sólida total média ($t.d^{-1}$)	374.581	1971-2007	1.549.177	1977-2007	1.448.590	1967-2006
					1.579.270	1977-2007
Produção de sedimento total ($t.km^{-2}.ano^{-1}$)	213,9	1971-2007	628,4	1977-2007	582,8	1977-2007
% da descarga em suspensão em relação à total	92,15	1971-2007	94,2	1977-2007	94,17	1977-2007

-A descarga sólida do Madeira é uma das maiores do mundo, sendo que na foz com o Amazonas se iguala ou supera a deste, embora sua vazão líquida seja três vezes menor

-A descarga em suspensão é predominante

-O Madeira provavelmente ocupa o 4º lugar em rios com maior carga sólida no mundo, depois do Amarelo e Bangladesh e do Amazonas na foz.

-O controle de sedimentos na bacia é difícil devido: ao seu tamanho, às rochas frágeis, alta precipitação e outros fatores.

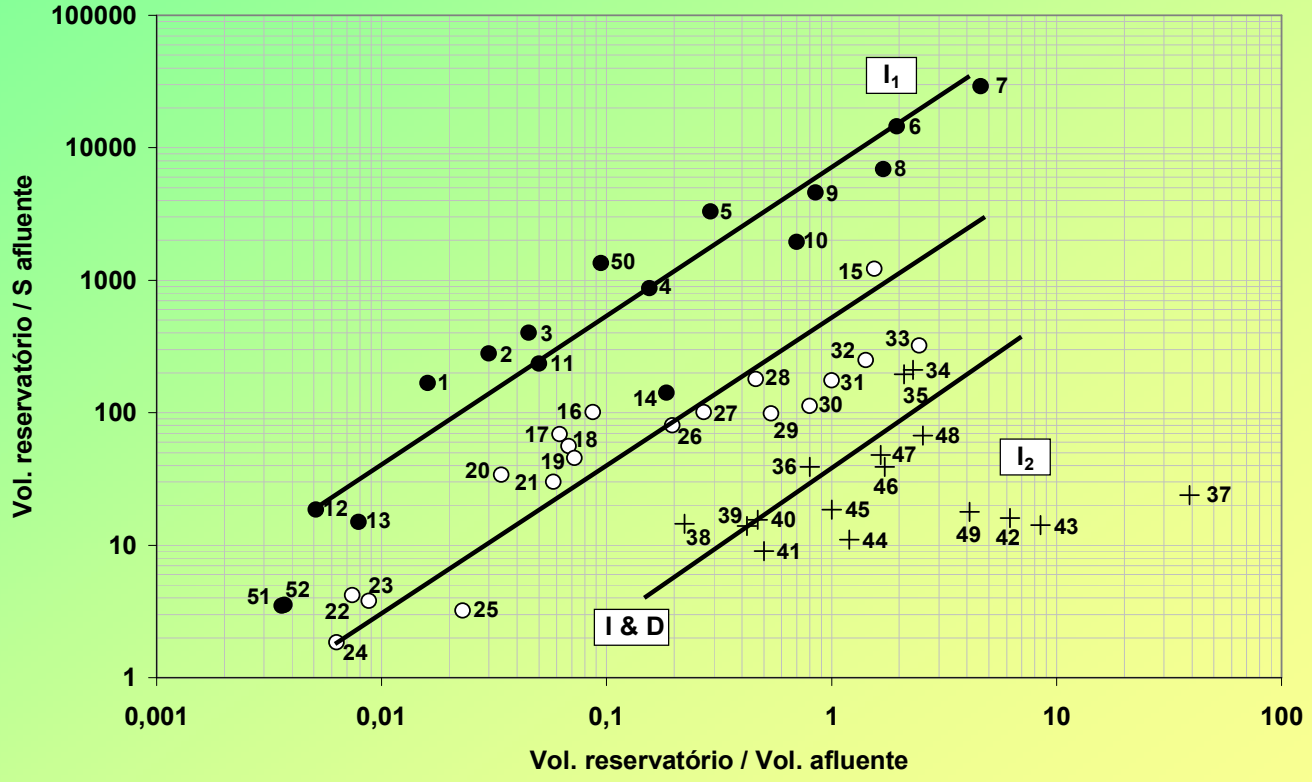
-Adicione-se a esses problemas grande quantidade de troncos de madeira que o rio transporta, principalmente na época das chuvas, ocasião de muita erosão marginal

-Para a construção das usinas, segundo consultoria especializada, considerando impedimentos apontados pela IBAMA, não deveria ter sérios problemas de assoreamento devido a predominância de granulometria fina dos sedimentos.

-Foi previsto monitoramento hidrossedimentológico permanente

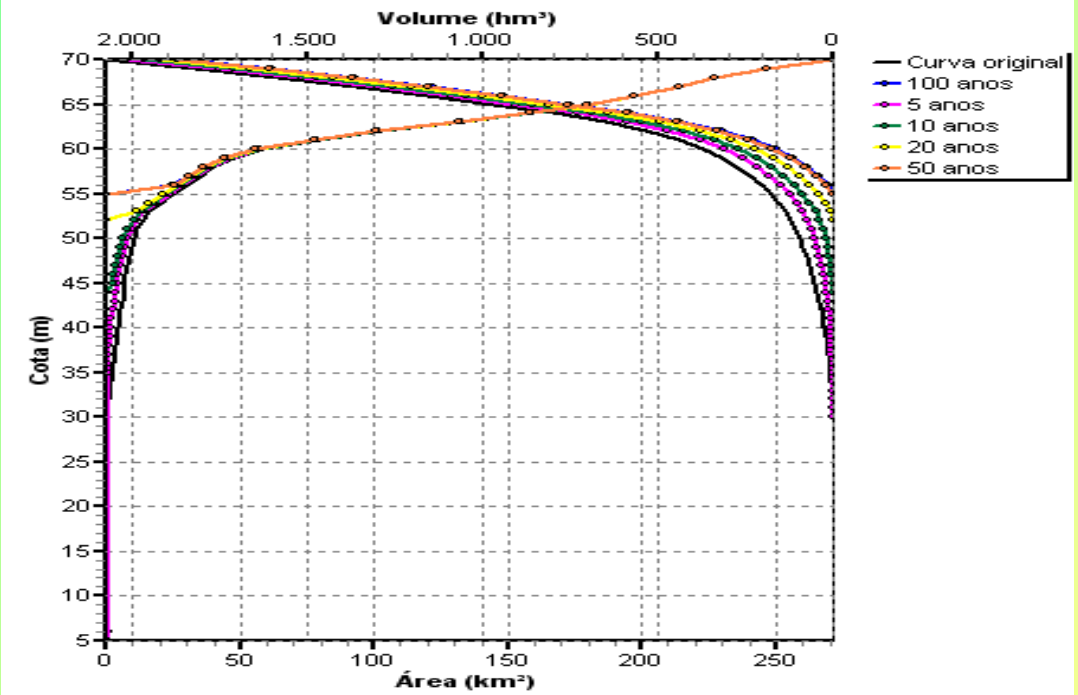
Os resultados de medições foram utilizados em vários estudos, incluindo trabalhos contratados pela PCE, com a HICON e com a Consultora Canadense NHC, *Northwest Hydraulic Consultants*.

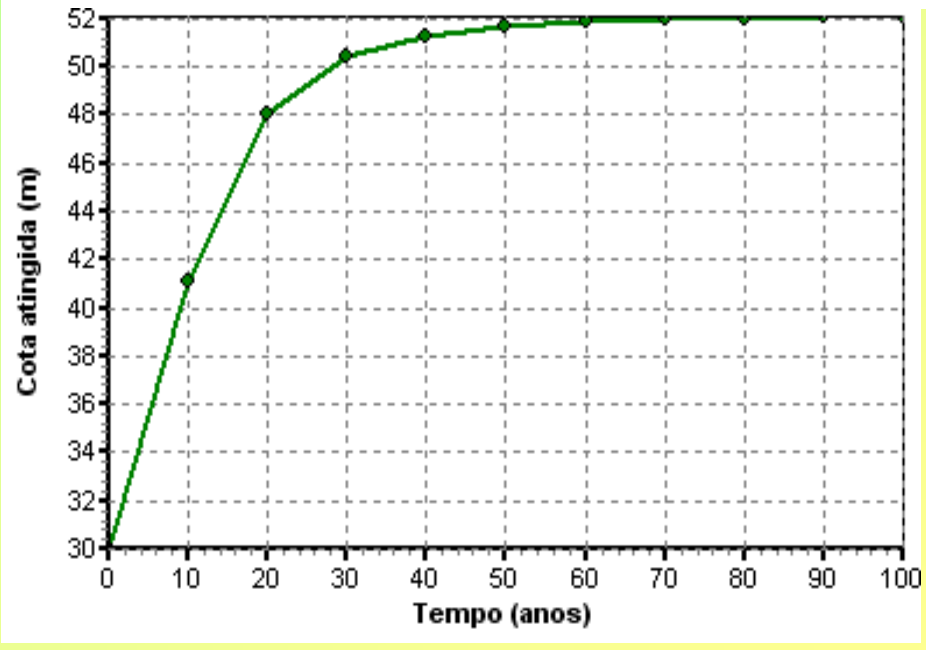
Na época de estudos preparei o gráfico abaixo baseado em trabalho do Prof. Di Sílvio, Zhou Zhide e outros (WASER / IRTCES / China).



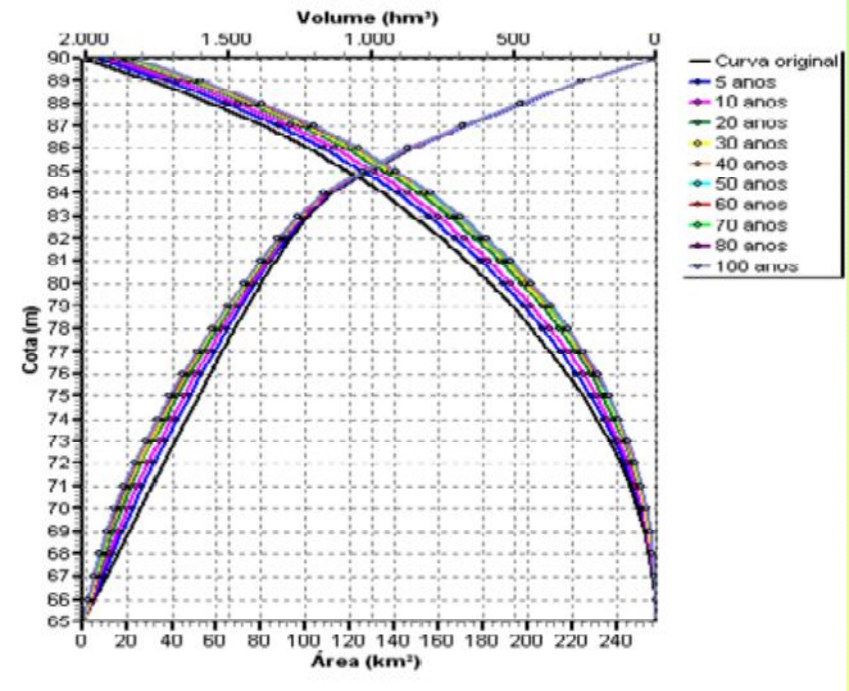
No gráfico, a linha de cima é o limite de reservatórios de vida longa para assoreamento, enquanto entre essa linha e a seguinte mostram pontos obtidos para reservatórios que exigem cuidados em relação a depósitos. Os pontos mais de baixo, com sinal +, representam reservatórios já completamente assoreados. O ponto 50 se refere a Itaipu cuja vida útil é maior que 200 anos. O ponto indicado por 51 / 52 é a plotagem com dados referentes a Jirau e Santo Antônio que indica cuidados em relação a depósitos

- SIMULAÇÃO DO ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO DE SANTO ANTÔNIO – dados de 2003-2006 – Método de Borland & Miller
- 1º gráfico – mostra que os depósitos iriam para a área próxima da barragem
- 2° gráfico – quando os depósitos atingissem a cota de 52 m, com 50 anos, todo o sedimento afluente sairia para jusante
- Certamente que as duas enchentes não incluídas modificaram essas conclusões.

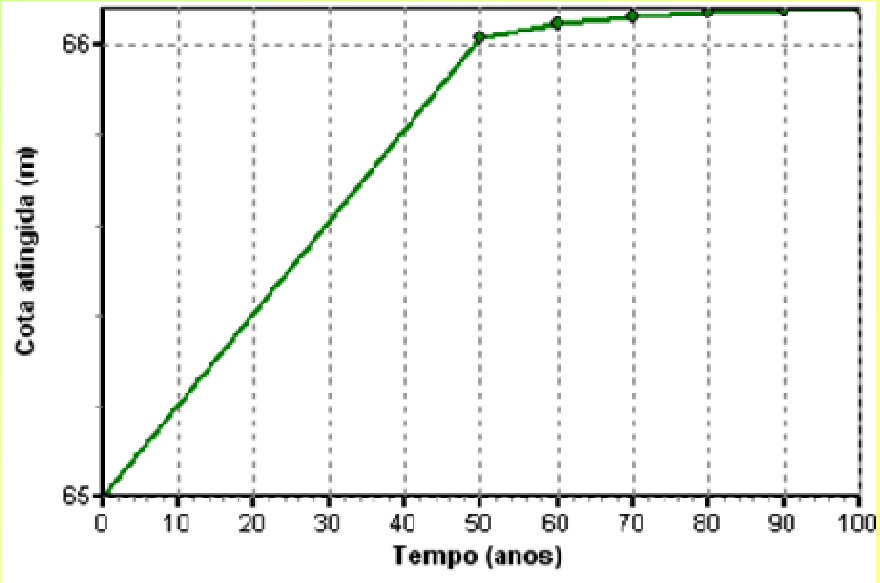




- Jirau, mostrando que os depósitos seriam distribuídos ao longo do reservatório, em camada uniforme (local do inventário de Furnas)

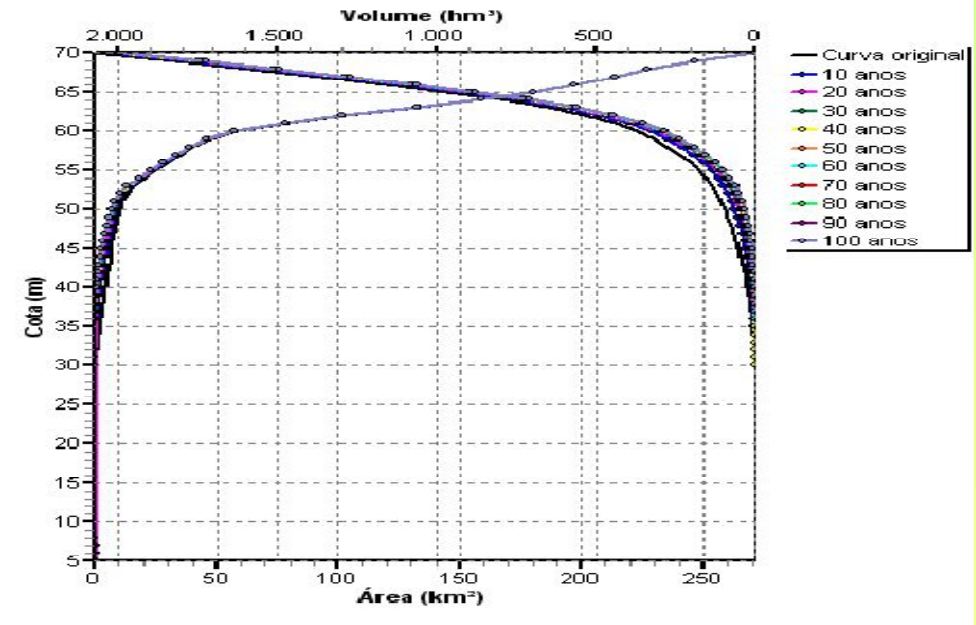


- quando os depósitos atingissem a cota 62, com 50 anos, praticamente todo o sedimento afluente sairia para jusante.

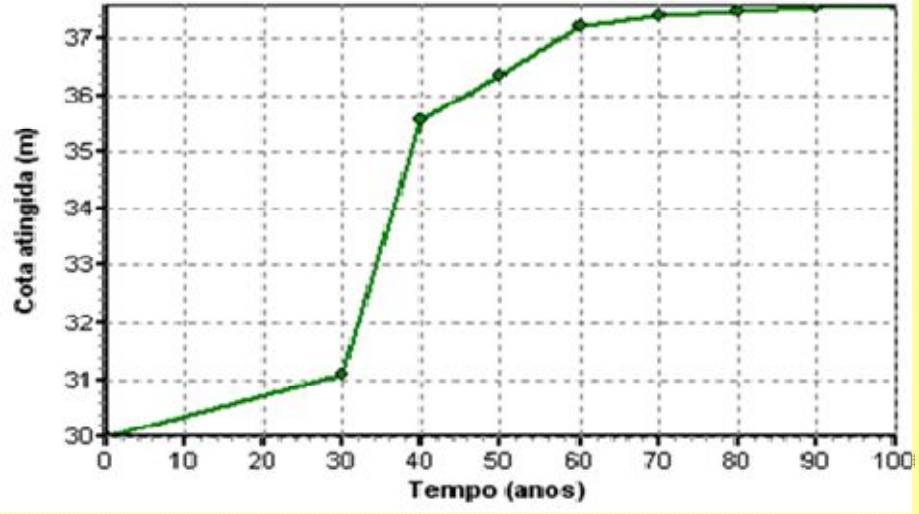


Estudo sinérgico de Jirau e Santo Antônio

Assoreamento do reservatório de Santo Antônio considerando a retenção do sedimento em Jirau (posição do estudo de inventário)



Altura de depósito de sedimento no pé da barragem de Santo Antônio com retenção em Jirau – os depósitos só chegariam com 30 anos

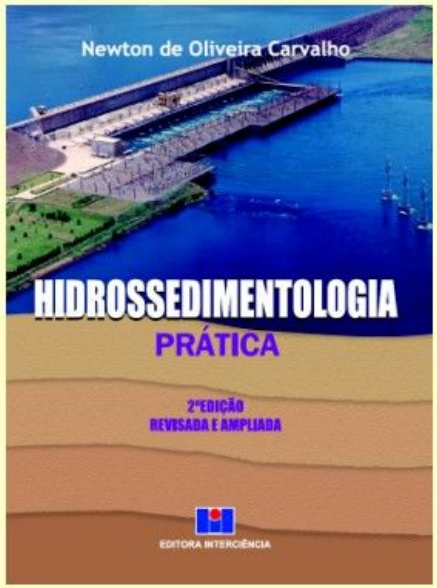


Atualmente há registros de assoreamento em áreas próximas às barragens, em parte agravados pelas duas enchentes ocorridas

Fig. 21 - Reservatório de Santo Antônio – período de níveis baixos em 2016

Fig. 22 - Jirau – assoreamento visível no reservatório

Essa publicação, de minha autoria, mostra a metodologia utilizada nas medições e nos cálculos de assoreamento mostrados na apresentação



Eis a capa da 2ª. Edição, revisada e ampliada, do meu livro

Hidrossedimentologia Prática

Agora com 599 páginas, contém anexos meus e de outros autores. Também contém um CD com programas computacionais diversos para o cálculo da vazão, da carga sólida e do assoreamento de reservatórios, manuais de aplicação e formulários para uso no campo e no laboratório.

A obra apresenta conceitos básicos de forma simplificada, importante para aqueles que se iniciam nos estudos de Sedimentologia. Mostra de forma prática como medir o sedimento na Natureza.

Editado pela Editora Interciência, tradicional no País, o livro pode ser adquirido:

- Na Livraria Interciência (livraria@interciencia.com.br) e nas livrarias ligadas à Editora (www.editorainterciencia.com.br)
- Na ABRH: abrh@abrh.org.br e www.abrh.org.br
- Na ABGE: abge@ipt.br e www.abge.com.br
- Com o autor: newtonoc@openlink.com.br

Obrigado pela atenção,

Newton de Oliveira Carvalho
Consultor em Sedimentologia

Agradeço a oportunidade, a atenção e estou às ordens perguntas

Nota – Disponível para quem quiser copiar, tenho em mãos um pendrive constando:

1 – Apresentação sobre medições e estudos no Rio Madeira

2 – Dissertação de Mestrado de Roberta Campeão com apresentação do SEDIM 2.0 que substitui o SEDIM, programa de cálculo de descarga sólida que consta no DVD do livro Hidrossedimentologia Prática de minha autoria e que atualmente não é aceito pelo Windows novo.

3 – Programa de cálculo de descarga sólida de Van Rijn também substituindo programa no mesmo DVD, grupo de programas cedidos por João Paiva

4 – Dois programas para cálculo da descarga sólida para substituir programas também recusados pelo novo Windows

5 – MANUAIS – constando diversos e.books de diversos autores para uso pelo pessoal que trabalha com Recursos Hídricos e, especialmente , com Sedimentologia