

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM

HÁ MAIS DE 50 ANOS **GERANDO** E **DISSEMINANDO** O CONHECIMENTO GEOCIENTÍFICO COM **EXCELÊNCIA**



SECRETARIA DE
GEOLOGIA, MINERAÇÃO
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

GOVERNO
FEDERAL



CURVA-CHAVE TRAÇADA PELO MÉTODO DE JOHNSON E O AJUSTE POR OTIMIZAÇÃO MATEMÁTICA DE TESTES DE HIPÓTESES

francisco.marcuzzo@sgb.gov.br



SECRETARIA DE
GEOLOGIA, MINERAÇÃO
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

GOVERNO
FEDERAL

Motivação e Objetivo

Motivação:

1. Entender o método/ algoritmo de Johnson no traçado inicial da curva-chave;
2. Entender no gráfico cartesiano as modificações nos coeficientes a e n da equação da curva-chave, visando executar um melhor ajuste;
3. Ajustar a curva-chave oriunda do traçado inicial do método/ algoritmo de Johnson por otimização matemática, testando um e dois tramos, com o desvio entre a vazão medida em campo e a calculada otimizado por Programação Matemática Não Linear e Algoritmo Genético.

Objetivo:

O objetivo deste estudo foi traçar a curva-chave da estação fluviométrica Raigão Alto (74424500) pelo método de Johnson com um e dois tramos, e após isso buscar a menor somatória dos desvios médios absolutos com duas diferentes opções de ajuste variando a relação h_3 e Q_3 , sendo uma opção deixar as relações h_1 e Q_1 , e, h_2 e Q_3 fixas, e a outra opção deixá-las variando dentro de um intervalo pré-estabelecido, utilizando a otimização matemática, seja ela por Programação Matemática Não Linear (PMNL) ou por Algoritmo Genético (AG).

O que é o método/algoritmo de Johnson?

Algoritmo de Johnson é uma forma de encontrar o menor caminho entre dois pontos.

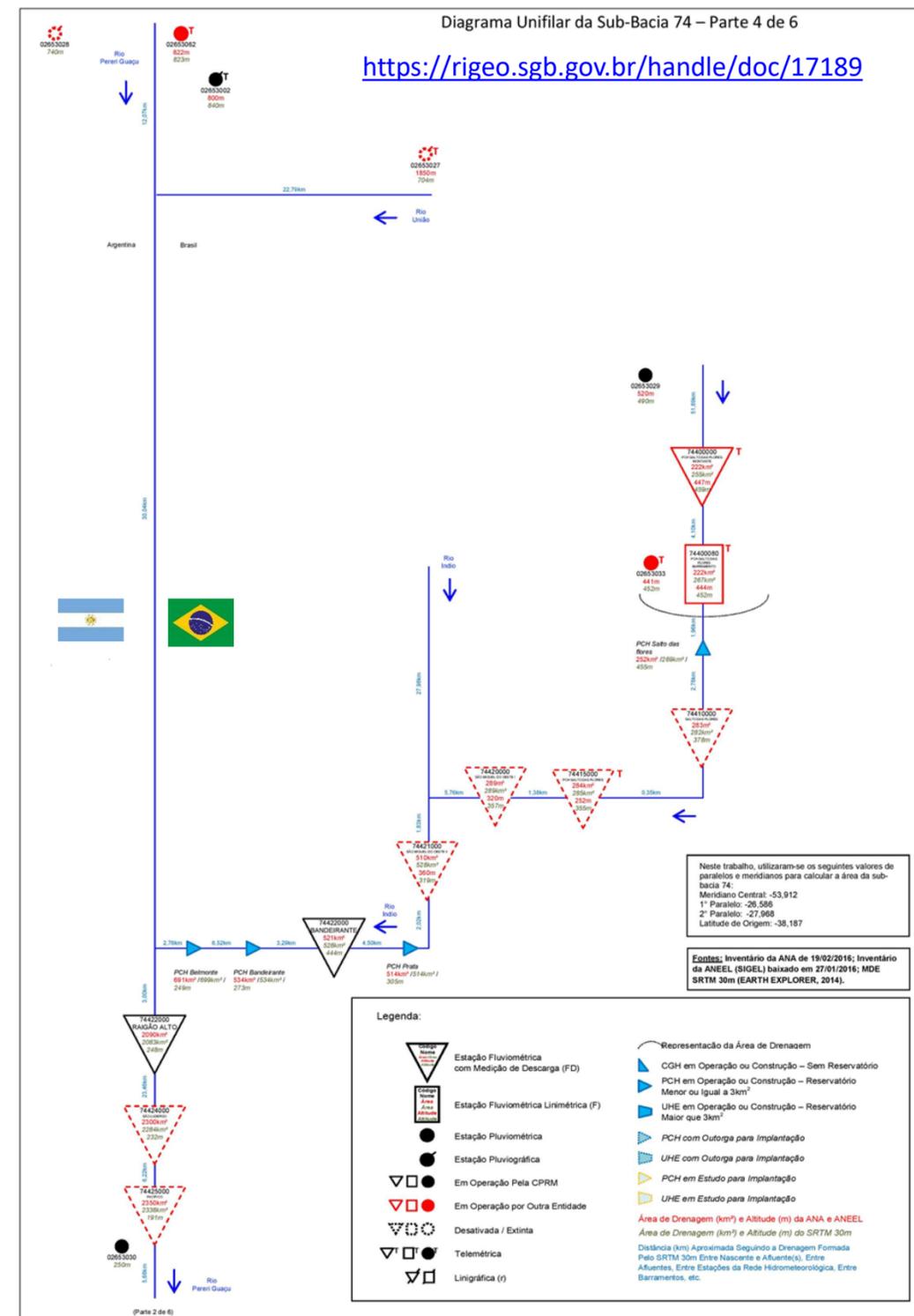
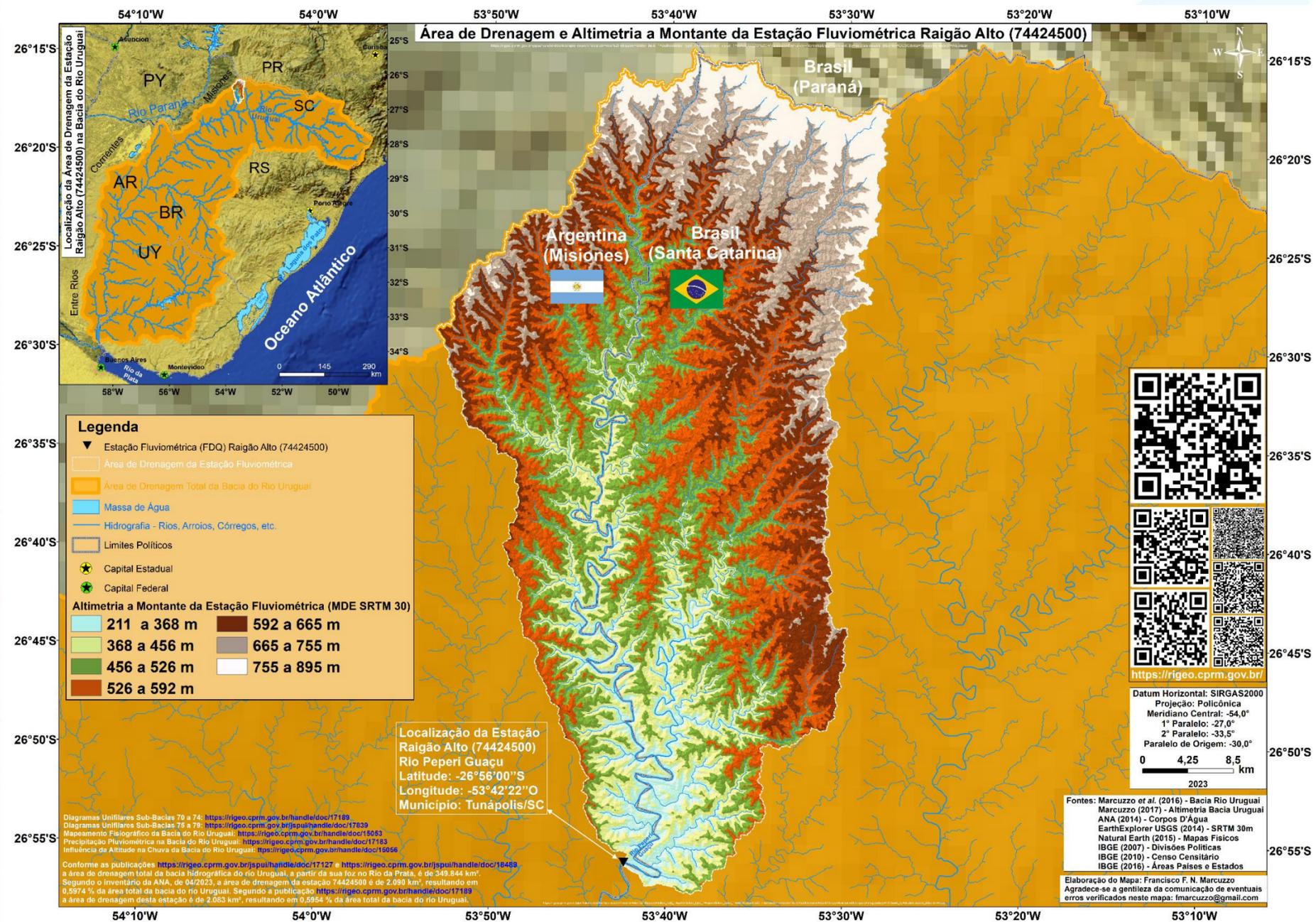
Ele permite que algumas arestas tenham número negativo, mas ciclos negativos não devem existir. Este algoritmo trabalha com base no algoritmo de Bellman-Ford, para computar uma transformação de um grafo de entrada, que remove todas os pesos negativos, permitindo o uso do algoritmo de Dijkstra no grafo transformado.

Possui o nome de algoritmo de Johnson em homenagem a Donald B. Johnson, o primeiro a descrevê-lo, em 1977.

Estação 74424500 – Raigão Alto – Localização, Altimetria a Montante da Estação e Diagrama Unifilar do Rio Peperi Gi

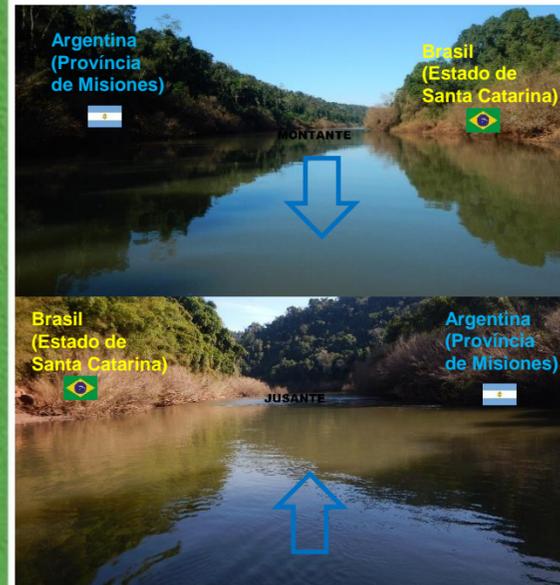
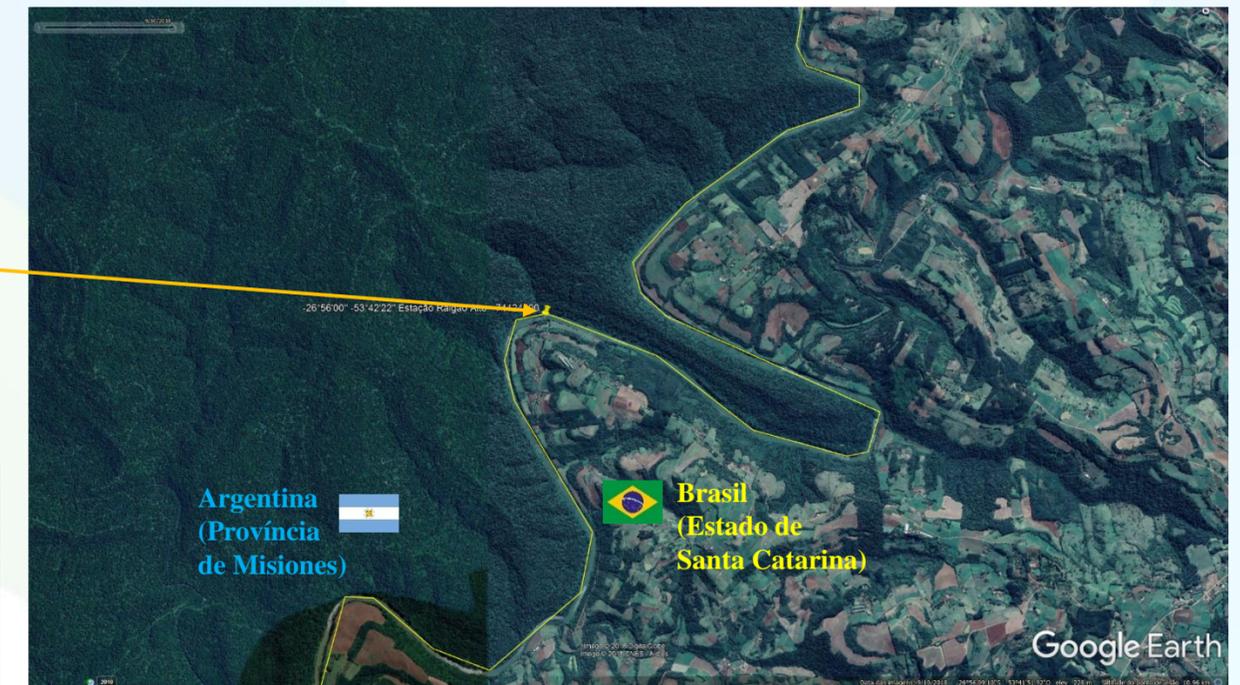
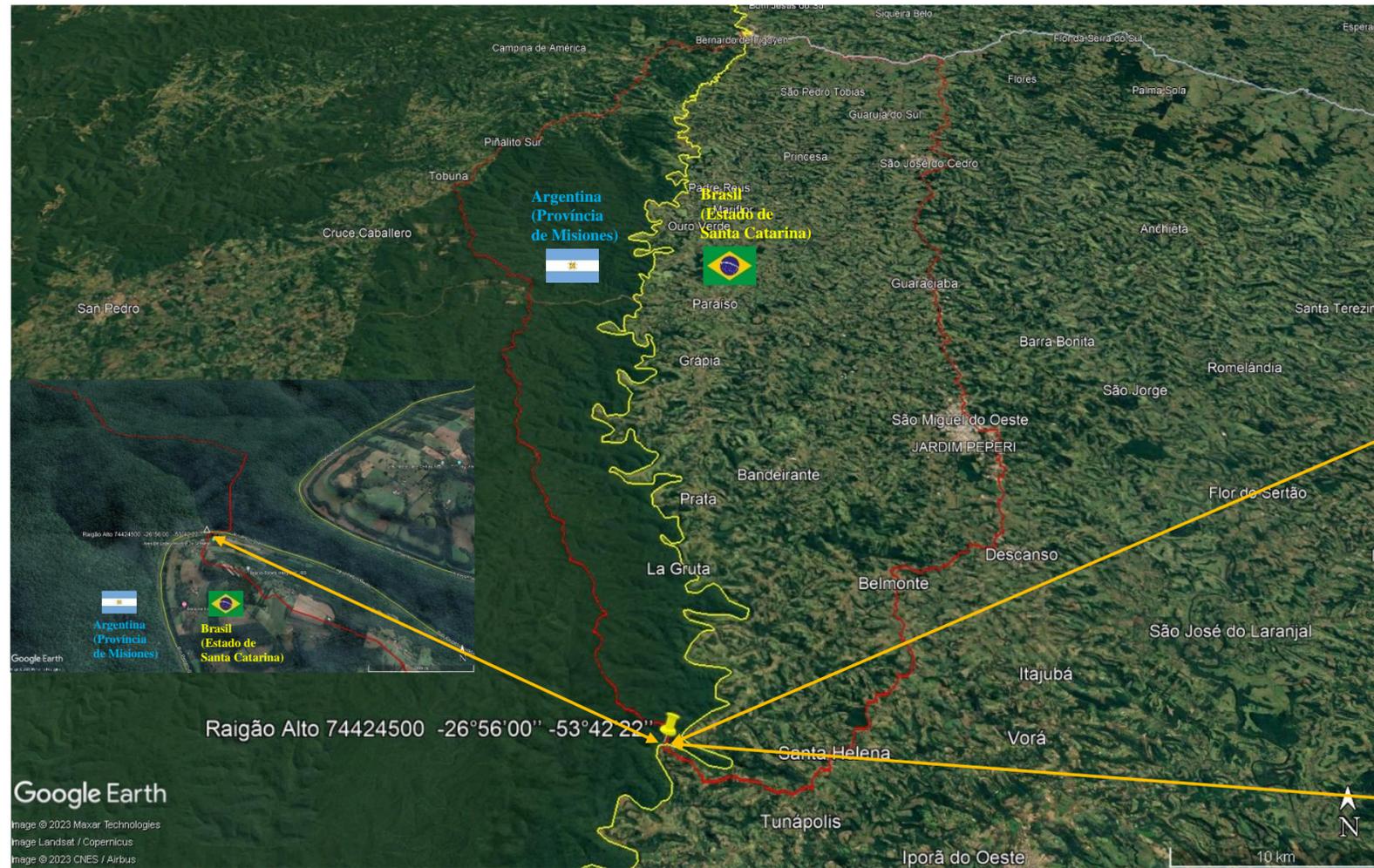
A estação fluviométrica com medição de descarga líquida e qualidade de água (FDQ) utilizada neste estudo, Raigão Alto – código 74424500, está localizada no município de Tunápolis/SC (Latitude: -26°56'00" Longitude: -53°42'22"), bem na fronteira do Brasil, no estado de Santa Catarina, com a Argentina, na província de Misiones, no rio Peperi Guaçu, possui uma área de drenagem de 2.090 km², altitude de 248 m e foi instalada em julho de 2000.

O rio Peperi Guaçu é afluente na margem direita do rio Uruguai, sendo que no seu exutório encontra-se o ponto da tríplice divisão entre os territórios da província de Misiones, na Argentina, e dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, no Brasil.



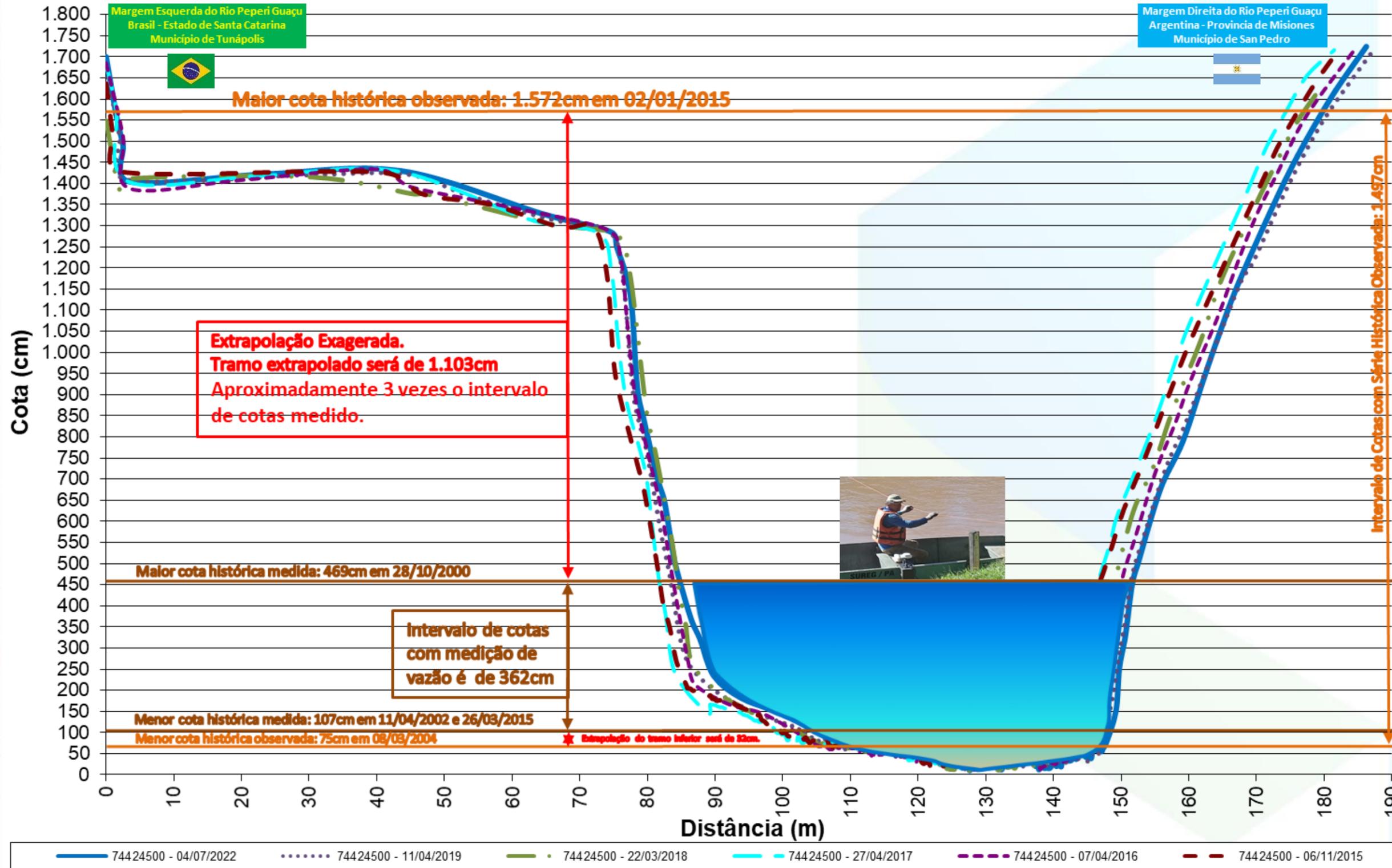
SGB-CPRM

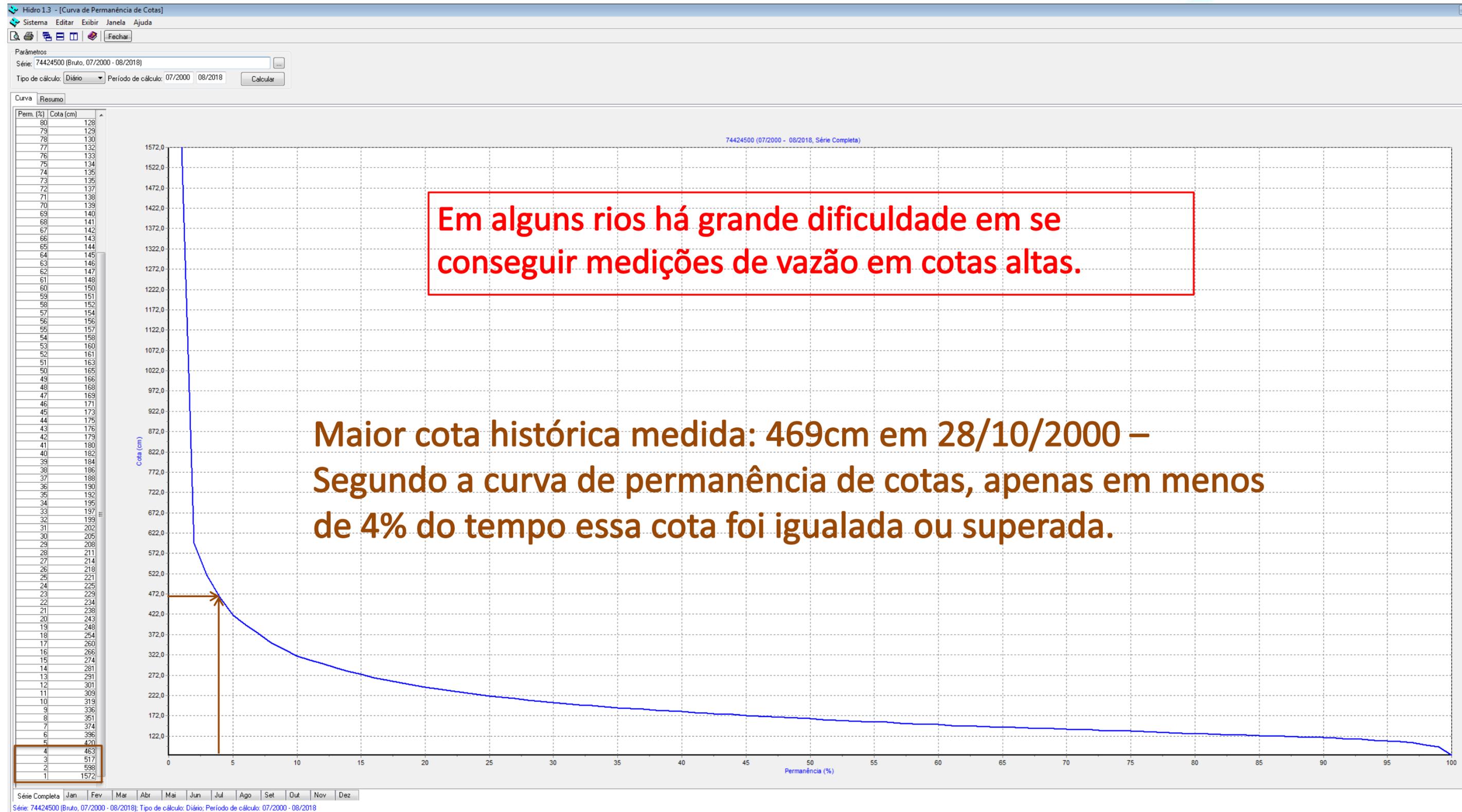
Estação 74424500 – Raigão Alto – Localização Imagens de Satélite e Fotos da Estação



SGB-CPRM

Estação 74424500 – Raigão Alto - Perfil Transversal de 2015 a 2022





Sistema para Análise de Dados Hidrológicas – SIADH (ANA)

O sistema pode ser baixado do sítio:

<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/sistemas>

The screenshot shows the ANA (Agência Nacional de Águas) website. The main navigation bar includes 'Sistemas' and 'Gestão e Análise de Dados Hidrológicos'. Under 'Sistemas', there are four main categories: HidroWeb, Sistema Hidro, Sistema SIADH, and Sistema SVDT. Each category has a brief description and a link to 'ACESSAR O SISTEMA' or 'ACESSAR O INSTALADOR DO SISTEMA'. The 'Sistema SIADH' entry is highlighted, indicating it is the focus of the presentation.

The screenshot shows the SIADH software interface. The top menu bar includes 'Análise de Dados', 'Automação', 'Sistema', 'Ferramentas', and 'Ajuda'. The 'Ajuda' menu is open, showing options like 'Controle de Versão', 'Verificar Atualização', 'Manual do Sistema', and 'Sobre'. The 'Manual do Sistema' option is highlighted with a red box. Below the menu, there is a section for 'Exportar Gráficos Fluviométricos' with various configuration options and a list of files to be processed. The file list includes '448-Planilha Excel para Análise e Traçado de Curva-chave', which is also highlighted with a red box.

Para obter mais informações sobre o **SIADH** ou comunicar algum problema na utilização do sistema, entre em contato com: hidro@ana.gov.br ou sgh@ana.gov.br

Na planilha gerada pelo SIADH procurar a aba “Curva-chave – Mét. Analítico”

SCGB-CPRM

74424500-1.xls [Reparado] [Modo de Compatibilidade] - Microsoft Excel

Arquivo | Página Inicial | Inserir | Layout da Página | Fórmulas | Dados | Revisão | Exibição | Foxit Reader PDF

Normal | Bom | Incorreto | Neutra | Cálculo | Célula de Ve... | Célula Vincul... | Entrada | Hiperlink | Hiperlink Visi...

Área de Transferência | Fonte | Alinhamento | Número

I6 =MÉDIA(I9:I191)

Curva	01/02	02/02
a	1,69	1,69
h0 (m)	0,00	0,00
n	3,42	3,41
Hmáx	469,00	
Hmín	107,00	
Him	1000	

Desvio Méd. (%) 49,92

Johnson's Method	01/02	02/02
h_1 (m) =	1,07	1,07
h_2 (m) =	4,69	4,69
h_3 (m) =	2,24	2,24
h_4 (m) =	0,00	0,00
n =	3,42	3,41
Q_1 (m³/s) =	2	2
Q_2 (m³/s) =	330,50	330,50
Q_3 (m³/s) =	27,00	27,00
a =	1,69	1,69

Data	Hora	Número da medição	Cota (cm)	Vazão Média (m³/s)	Vazão Calculada (m³/s)	Desvio²	Desvio (%)	Desvio Abs. (%)	Logarítmico Cota (cm)	Vazão Calculada - Incremento (m³/s)	
11/04/2002	09:35	6	107	2,13	2,13	0,15	-15,29	0,15	75,00	0,63	0,03
26/03/2015	10:16	43	107	2,13	2,13	0,00	-0,17	0,17	76,00	0,66	0,03
29/08/2012	09:30	35	110	2,08	2,34	0,07	12,35	0,07	77,00	0,69	0,03
02/02/2012	07:30	33	117	4,06	2,88	1,38	-26,94	28,94	78,00	0,72	0,03
27/08/2007	11:00	19	122	6,44	3,33	9,68	-48,32	48,32	79,00	0,75	0,03
26/05/2018	11:36	54	122	5,5	3,33	4,72	-39,49	39,49	80,00	0,79	0,03
29/03/2007	11:30	18	125	7,47	3,62	14,85	-51,59	51,59	81,00	0,82	0,04
11/08/2003	13:00	11	126	6,4	3,72	7,21	-41,94	41,94	82,00	0,86	0,04
26/08/2010	09:00	27	127	7,02	3,82	10,26	-45,62	45,62	83,00	0,89	0,04
28/07/2016	09:28	47	128	6,48	3,92	6,55	-39,49	39,49	84,00	0,93	0,04
18/08/2014	10:10	41	129	6,01	4,03	3,93	-33,00	33,00	85,00	0,97	0,04
09/12/2004	09:50	14	130	9,87	4,13	32,90	-58,11	58,11	86,00	1,01	0,04
31/08/2018	09:03	55	132	7,72	4,36	11,32	-43,58	43,58	87,00	1,05	0,04
31/08/2006	11:00	17	136	12,7	4,82	62,05	-82,02	82,02	88,00	1,09	0,04
01/06/2012	08:35	34	137	9,63	4,95	21,95	-48,65	48,65	89,00	1,13	0,04
15/11/2013	09:43	39	138	9,31	5,07	17,98	-45,55	45,55	90,00	1,18	0,05
24/11/2010	06:40	28	144	13,7	5,96	61,43	-57,21	57,21	91,00	1,22	0,05
07/04/2016	09:28	46	145	13,31	6,00	53,40	-54,90	54,90	92,00	1,27	0,05
19/12/2002	11:30	9	148	15,8	6,44	87,85	-59,26	59,26	93,00	1,32	0,05
08/04/2003	09:20	10	148	15,5	6,44	82,13	-58,47	58,47	94,00	1,37	0,05
13/06/2011	09:05	30	152	16,3	7,05	85,54	-56,74	56,74	95,00	1,42	0,05
17/07/2013	09:47	38	154	17,8	7,37	108,72	-58,58	58,58	96,00	1,47	0,05
26/11/2012	08:45	36	163	23,28	8,95	205,30	-61,55	61,55	97,00	1,52	0,05
04/06/2002	09:20	7	164	24,08	9,14	223,19	-62,04	62,04	98,00	1,58	0,06
11/12/2003	10:15	12	166	26,3	9,53	281,34	-63,78	63,78	99,00	1,63	0,06
23/01/2001	07:00	3	167	25,62	9,72	252,68	-62,04	62,04	100,00	1,69	0,06
03/07/2009	07:30	23	169	23,2	10,13	170,88	-56,35	56,35	101,00	1,75	0,06
10/12/2007	10:00	20	171	29,2	10,54	348,09	-63,89	63,89	102,00	1,81	0,06
01/08/2000	07:00	1	172	28,5	10,75	314,89	-62,26	62,26	103,00	1,87	0,06
01/09/2017	09:30	51	172	29,88	10,75	365,77	-64,01	64,01	104,00	1,93	0,06
17/09/2004	15:00	13	174	30,3	11,19	365,27	-63,08	63,08	105,00	1,99	0,07
25/10/2005	10:30	16	177	35,8	11,86	573,09	-66,87	66,87	106,00	2,06	0,07
06/05/2010	09:15	26	181	30,9	12,80	327,57	-58,57	58,57	107,00	2,13	0,07
06/09/2011	07:20	31	182	31,1	13,04	326,01	-58,06	58,06	108,00	2,19	0,07
28/07/2005	13:50	15	187	42,8	14,31	811,72	-66,57	66,57	109,00	2,27	0,07
11/10/2008	09:30	22	192	38,8	15,66	535,52	-59,64	59,64	110,00	2,34	0,07
27/04/2017	09:45	49	200	48,27	18,00	916,21	-62,71	62,71	111,00	2,41	0,07
31/03/2014	09:40	40	206	49,07	19,91	850,13	-59,42	59,42	112,00	2,49	0,08
01/07/2008	08:30	21	209	45,9	20,92	623,96	-54,42	54,42	113,00	2,56	0,08
01/03/2011	06:30	29	218	61,8	24,16	1.416,72	-60,91	60,91	114,00	2,64	0,08
08/04/2013	09:14	37	225	59,96	26,91	1.092,02	-55,11	55,11	115,00	2,72	0,08
11/12/2009	09:00	25	227	61,2	27,74	1.119,57	-54,67	54,67	116,00	2,80	0,08
13/10/2001	09:00	5	232	69,8	29,88	1.593,39	-57,19	57,19	117,00	2,88	0,09
27/07/2001	07:00	4	236	70,2	31,68	1.483,86	-54,87	54,87	118,00	2,97	0,09
24/09/2002	10:25	8	236	72,4	31,68	1.658,19	-56,24	56,24	119,00	3,06	0,09
10/11/2014	09:41	42	260	93,6	44,10	2.450,51	-52,89	52,89	120,00	3,15	0,09
22/03/2018	09:40	53	262	109,9	45,27	4.177,48	-58,81	58,81	121,00	3,24	0,09
06/11/2015	10:00	45	267	98,85	48,29	2.556,79	-51,15	51,15	122,00	3,33	0,09
20/07/2015	09:49	44	283	114,89	58,90	3.134,86	-48,73	48,73	123,00	3,42	0,10
04/11/2016	09:46	48	308	152,38	78,65	5.436,62	-48,39	48,39	124,00	3,52	0,10
30/09/2009	16:15	24	325	162	94,48	4.558,34	-41,68	41,68	125,00	3,62	0,10
30/05/2017	09:24	50	344	198,05	114,72	6.944,47	-42,08	42,08	126,00	3,72	0,10
22/11/2011	10:00	32	361	200	135,26	4.191,40	-32,37	32,37	127,00	3,82	0,10
27/10/2017	11:18	52	399	258	190,37	4.573,65	-26,21	26,21	128,00	3,92	0,11
28/10/2000	11:30	2	469	330,5	330,62	0,02	0,04	0,04	129,00	4,03	0,11
									130,00	4,13	0,11
									131,00	4,24	0,11
									132,00	4,36	0,11
									133,00	4,47	0,12
									134,00	4,59	0,12
									135,00	4,70	0,12
									136,00	4,82	0,12
									137,00	4,95	0,12
									138,00	5,07	0,13
									139,00	5,20	0,13
									140,00	5,32	0,13
									141,00	5,46	0,13
									142,00	5,59	0,14
									143,00	5,72	0,14
									144,00	5,86	0,14
									145,00	6,00	0,14
									146,00	6,15	0,14
									147,00	6,29	0,14
									148,00	6,44	0,14
									149,00	6,59	0,14
									150,00	6,74	0,14

Planilha com 62 abas

Desvio x Tempo | Inc. Vazão x Cota | Curva-chave - Mét. Analítico | Mét. Analítico Gráfico (1) | Mét. Analítico Gráfico (2) | Hidro Detalhe Curvas-chave | Hidro Curva-chave (1) | Hidro Desvio Curva-chave (1) | Hidro Curva-chave (2) | Hidro Curva-chave (3) | Hidro Curva-chave (4) | Hidro Curva-chave (5) | Hidro Curva-chave (6) | Hidro Curva-chave (7)

Método / Algoritmo de JOHNSON (Método Analítico)

Exemplo utilizando o 448 (planilha excel para análise e traçado de curva-chave) gerada pelo SIADH (ANA):

Alterar apenas a célula **Hlim (B7)**; e as **células amarelas**;

Células em **verde escuro** são fórmulas para se achar os coeficientes da equação potencial;

The spreadsheet displays the following data:

Curva	01/02	02/02
a	1,69	1,69
h0 (m)	0,00	0,00
n	3,42	3,41

Curva	h ₁ (m)	h ₂ (m)	h ₃ (m)	h ₀ (m)	n
01/02	1,07	4,69	2,24	0,00	3,42
	Q ₁ (m ³ /s) = 2	Q ₂ (m ³ /s) = 330,50	Q ₃ (m ³ /s) = 27,00	a = 1,69	a = 1,69
02/02	1,07	4,69	2,24	0,00	3,41
	Q ₁ (m ³ /s) = 2	Q ₂ (m ³ /s) = 330,50	Q ₃ (m ³ /s) = 27,00	a = 1,69	a = 1,69

Data	Hora	Número da medição	Cota (cm)	Vazão Medida (m ³ /s)	Vazão Calculada (m ³ /s)	Desvio ²	Desvio (%)	Desvio Abs. (%)	Cota (cm)	Vazão Calculada (m ³ /s)	Vazão Calculada - Incremento (m ³ /s)
11/04/2002	09:35	6	107	2,51	2,13	0,15	-15,29	15,29	75,00	0,63	0,03
26/03/2015	10:16	43	107	2,13	2,13	0,00	-0,17	0,17	76,00	0,66	0,03
29/08/2012	09:30	35	110	2,08	2,34	0,07	12,35	12,35	77,00	0,69	0,03
02/02/2012	07:30	33	117	4,06	2,88	1,38	-28,94	28,94	78,00	0,72	0,03
27/08/2007	11:00	19	122	6,44	3,33	9,68	-48,32	48,32	79,00	0,75	0,03
26/05/2018	11:36	54	122	5,5	3,33	4,72	-39,49	39,49	80,00	0,79	0,03
29/03/2007	11:30	18	125	7,47	3,62	14,85	-51,59	51,59	81,00	0,82	0,04
11/08/2003	13:00	11	126	6,4	3,72	7,21	-41,94	41,94	82,00	0,86	0,04
26/08/2010	09:00	27	127	7,02	3,82	10,26	-45,62	45,62	83,00	0,89	0,04
28/07/2016	09:28	47	128	6,48	3,92	6,55	-39,49	39,49	84,00	0,93	0,04
18/08/2014	10:10	41	129	6,01	4,03	3,93	-33,00	33,00	85,00	0,97	0,04
09/12/2004	09:50	14	130	9,87	4,13	32,90	-58,11	58,11	86,00	1,01	0,04
31/08/2018	09:03	55	132	7,72	4,36	11,32	-43,58	43,58	87,00	1,05	0,04

Método de JOHNSON (Método Analítico)

Exemplo utilizando o 448 (planilha excel para análise e traçado de curva-chave) gerada pelo SIADH (ANA):

Alterar apenas as **células amarelas**; e a célula Hlim (B7);

Células em **verde escuro** são fórmulas para se achar os coeficientes da equação potencial;

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

Curva	01/02	02/02
a	1,69	1,69
h0 (m)	0,00	0,00
n	3,42	3,41

Desvio Méd. (%)	49,92
-----------------	-------

Data	Hora	Número da medição	Cota (cm)	Vazão Medida (m³/s)	Vazão Calculada (m³/s)	Desvio²	Desvio (%)	Desvio Abs. (%)	Cota (cm)	Vazão Calculada (m³/s)	Vazão Calculada - Incremento (m³/s)
11/04/2002	09:35	6	107	2,51	2,13	0,15	-15,29	15,29	75,00	0,63	0,03
26/03/2015	10:16	43	107	2,13	2,13	0,00	-0,17	0,17	76,00	0,66	0,03
29/08/2012	09:30	35	110	2,08	2,34	0,07	12,35	12,35	77,00	0,69	0,03
02/02/2012	07:30	33	117	4,06	2,88	1,38	-28,94	28,94	78,00	0,72	0,03
27/08/2007	11:00	19	122	6,44	3,33	9,68	-48,32	48,32	79,00	0,75	0,03
26/05/2018	11:36	54	122	5,5	3,33	4,72	-39,49	39,49	80,00	0,79	0,03
29/03/2007	11:30	18	125	7,47	3,62	14,85	-51,59	51,59	81,00	0,82	0,04
11/08/2003	13:00	11	126	6,4	3,72	7,21	-41,94	41,94	82,00	0,86	0,04
26/08/2010	09:00	27	127	7,02	3,82	10,26	-45,62	45,62	83,00	0,89	0,04
28/07/2016	09:28	47	128	6,48	3,92	6,55	-39,49	39,49	84,00	0,93	0,04
18/08/2014	10:10	41	129	6,01	4,03	3,93	-33,00	33,00	85,00	0,97	0,04
09/12/2004	09:50	14	130	9,87	4,13	32,90	-58,11	58,11	86,00	1,01	0,04
31/08/2018	09:03	55	132	7,72	4,36	11,32	-43,58	43,58	87,00	1,05	0,04

Johnson's Method					
01/02	h ₁ (m) = 1,07	h ₂ (m) = 4,69	h ₃ (m) = 2,24	h ₀ (m) = 0,00	n = 3,42
	Q ₁ (m³/s) = 2	Q ₂ (m³/s) = 330,50	Q ₃ (m³/s) = 27,00	a = 1,69	a = 1,69
02/02	h ₁ (m) = 1,07	h ₂ (m) = 4,69	h ₃ (m) = 2,24	h ₀ (m) = 0,00	n = 3,41
	Q ₁ (m³/s) = 2	Q ₂ (m³/s) = 330,50	Q ₃ (m³/s) = 27,00	a = 1,69	a = 1,69

Método de JOHNSON (Método Analítico): Equações Necessárias

Exemplo utilizando o 448 (planilha excel para análise e traçado de curva-chave) gerada pelo SIADH (ANA)

$$h_0 = \frac{h_1 h_2 - h_3^2}{h_1 + h_2 - 2h_3}$$

$$n = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{\log(h_1 - h_0) - \log(h_2 - h_0)}$$

$$a = \frac{Q}{(h - h_0)^n}$$

$$Q_3 = \sqrt{(Q_1 Q_2)}, \text{ sendo } Q_1 \neq 0$$

Johnson's Method								
01/02	h_1 (m) =	1,07	h_2 (m) =	4,69	h_3 (m) =	2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,42$
	Q_1 (m ³ /s) =	2	Q_2 (m ³ /s) =	330,50	Q_3 (m ³ /s) =	27,00	$a = 1,69$	$a = 1,69$

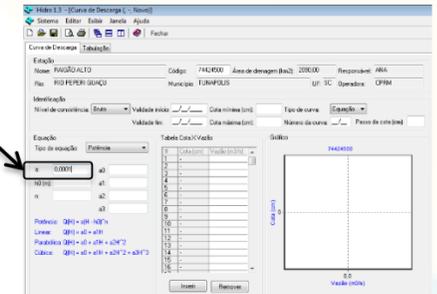
Johnson's Method										
01/02	h_1 (m) =	1,07	h_2 (m) =	4,69	h_3 (m) =	2,24	h_0 (m) =	0,00	$n =$	3,42
02/02	h_1 (m) =	1,07	h_2 (m) =	4,69	h_3 (m) =	2,24	h_0 (m) =	0,00	$n =$	3,41
	Q_1 (m ³ /s) =	2	Q_2 (m ³ /s) =	330,50	Q_3 (m ³ /s) =	27,00	$a =$	1,69	$a =$	1,69

Método de JOHNSON (Método Analítico): Alterando o coeficiente a da equação potencial

a é a constante que, se não alterada os outros elementos da equação (1), quanto maior for seu valor, maior será a vazão calculada para todo o intervalo de cotas e que, quanto menor for seu valor, menor será a vazão calculada para todo o intervalo de cotas; o coeficiente a pode também ser melhor entendido como sendo de posicionamento no eixo da abscissa do gráfico cartesiano da relação cota (ordenada) versus vazão (abscissa), ou seja, desde que não alterados os outros coeficientes da equação potencial quanto maior o valor do coeficiente a , mais a direita do gráfico ficará a curva-chave e quanto menor o valor do coeficiente a , mais a esquerda ficará a curva-chave.

$$a = \frac{Q}{(h - h_0)^n} \quad Q_{calculada} = a(h - h_0)^n$$

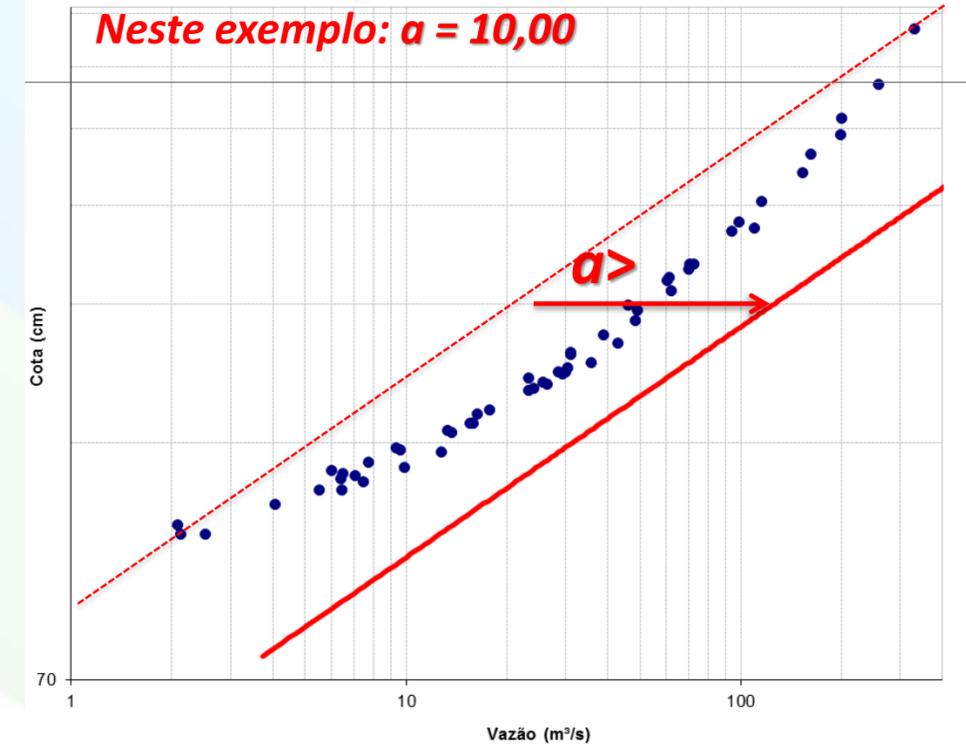
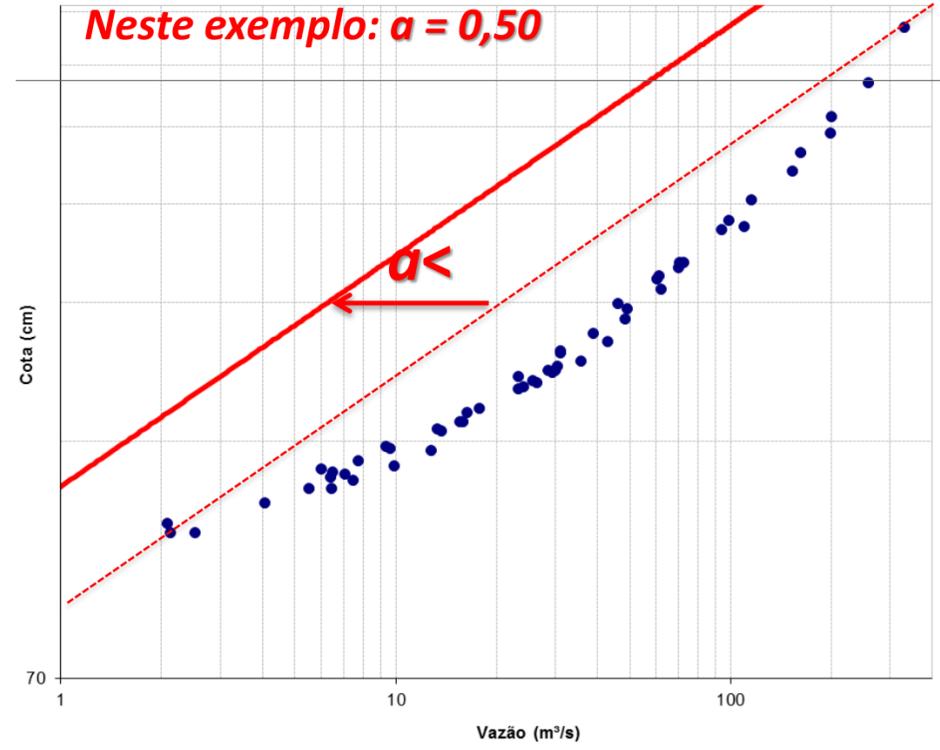
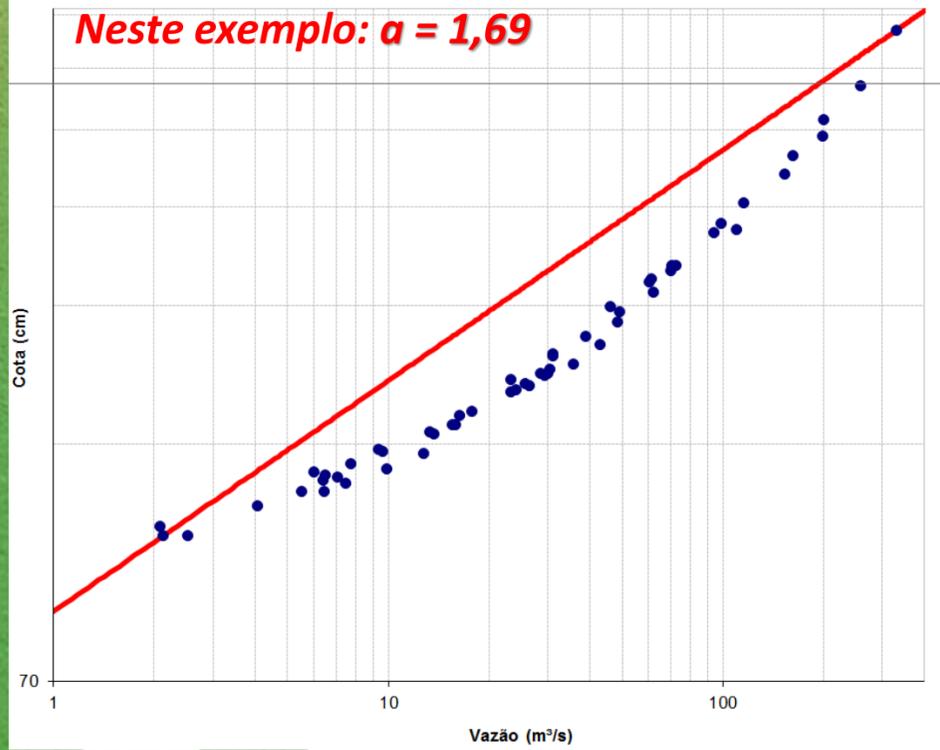
Restrição: O programa HIDRO da ANA, em 01/2019, utilizado para gerar vazão, permite inserir apenas quatro casas decimais (0,0000) no valor do coeficiente a da equação potencial, portanto, também, o coeficiente a deve ser maior ou igual a 0,0001.



Johnson's Method						
01/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,42$	
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 1,69$	
02/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,41$	
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 1,69$	

Johnson's Method						
01/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,42$	
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 0,50$	$a = 1,69$	
02/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,41$	
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 1,69$	

Johnson's Method						
01/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,42$	
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 10,00$	$a = 1,69$	
02/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,41$	
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 1,69$	



Método de JOHNSON (Método Analítico): Alterando o coeficiente n da equação potencial

n é a constante que, se não alterada o h_0 da equação, quanto maior for seu valor, maior será a vazão calculada para as cotas acima da relação h_1 e Q_1 e menor será a vazão para as cotas abaixo da relação h_1 e Q_1 ; O inverso é verdadeiro, ou seja, n é a constante que, se não alterada o h_0 da equação, quanto menor for seu valor, menor será a vazão calculada para as cotas acima da relação h_1 e Q_1 e maior será a vazão para as cotas abaixo da relação h_1 e Q_1 ; o coeficiente n pode também ser melhor entendido como sendo de posicionamento no eixo da abscissa do gráfico cartesiano da relação cota (ordenada) versus vazão (abscissa), ou seja, desde que não alterados o h_0 da equação potencial, quanto maior o valor do coeficiente n , mais a direita do gráfico ficará a parte da curva-chave com cota acima da relação h_1 e Q_1 e mais a esquerda ficará a parte da curva-chave com cota abaixo da relação h_1 e Q_1 ; O inverso é verdadeiro, ou seja, n é a constante que, se não alterada o h_0 da equação potencial, quanto menor o valor do coeficiente n , mais a esquerda do gráfico ficará a parte da curva-chave com cota acima da relação h_1 e Q_1 e mais a direita ficará a parte da curva-chave com cota abaixo da relação h_1 e Q_1 ; Nota-se que o eixo de rotação da curva-chave fica estabelecido como sendo o ponto da relação h_1 e Q_1 , ou seja, a cota mais baixa com vazão medida. Nota-se que modificando o coeficiente n também se modifica o coeficiente a , já que, além de ser função da cota, o coeficiente a é também função do coeficiente n .

$$n = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{\log(h_1 - h_0) - \log(h_2 - h_0)}$$

$$Q_{calculada} = a(h - h_0)^n$$

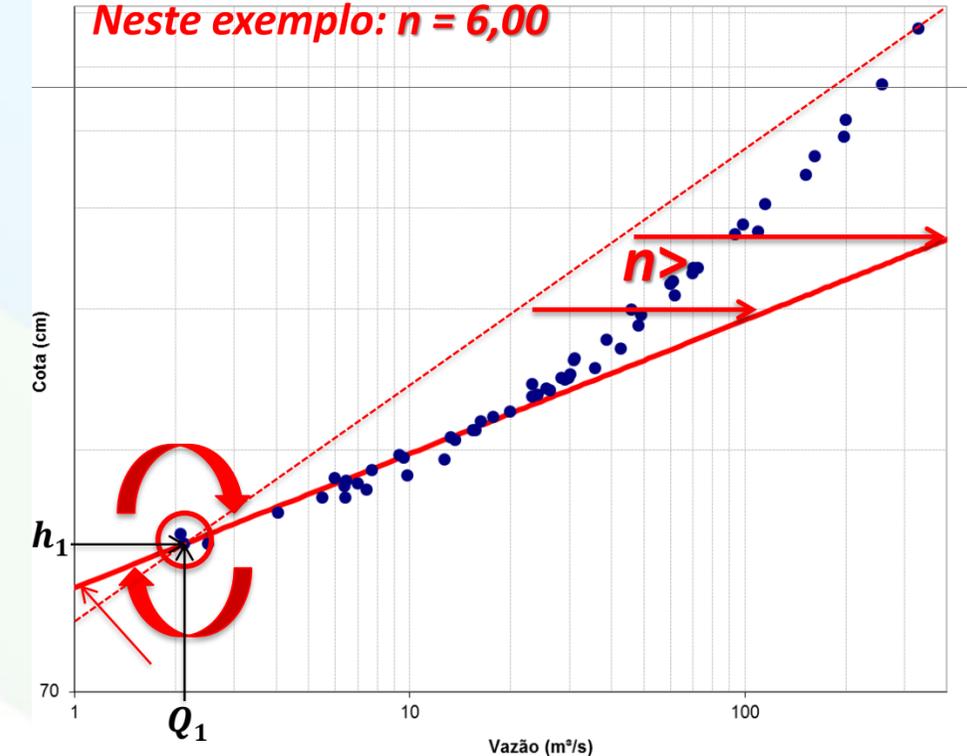
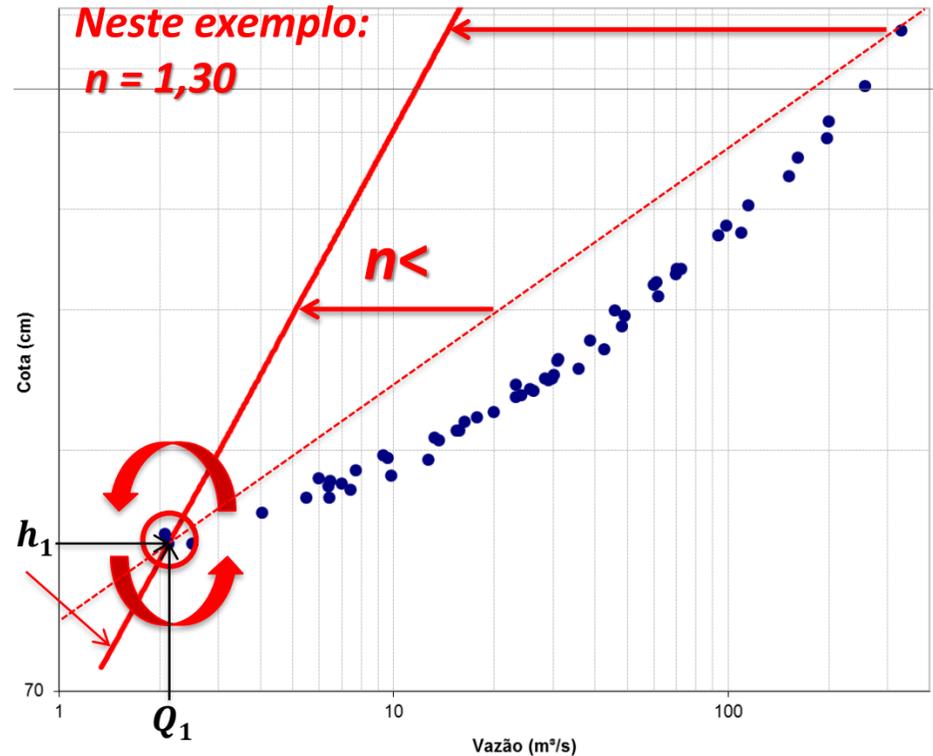
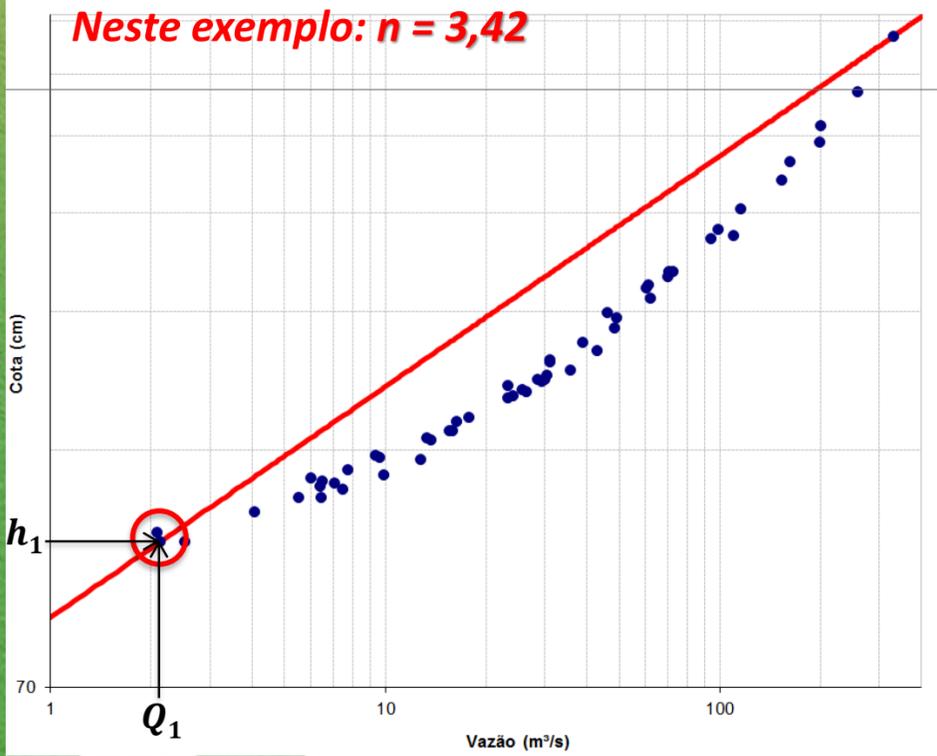
Atenção: Nota-se que modificando o coeficiente n também se modifica o coeficiente a , já que, também, além da cota, o coeficiente a é função do coeficiente n .

$$a = \frac{Q}{(h - h_0)^n}$$

Johnson's Method						
01/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,42$	
	Q_1 (m ³ /s) = 2	Q_2 (m ³ /s) = 330,50	Q_3 (m ³ /s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 1,69$	
02/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,41$	
	Q_1 (m ³ /s) = 2	Q_2 (m ³ /s) = 330,50	Q_3 (m ³ /s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 1,69$	

Johnson's Method						
01/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 1,30$	
	Q_1 (m ³ /s) = 2	Q_2 (m ³ /s) = 330,50	Q_3 (m ³ /s) = 27,00	$a = 1,95$	$a = 44,32$	
02/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 1,30$	
	Q_1 (m ³ /s) = 2	Q_2 (m ³ /s) = 330,50	Q_3 (m ³ /s) = 27,00	$a = 1,95$	$a = 44,32$	

Johnson's Method						
01/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 6,00$	
	Q_1 (m ³ /s) = 2	Q_2 (m ³ /s) = 330,50	Q_3 (m ³ /s) = 27,00	$a = 1,42$	$a = 0,03$	
02/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 6,00$	
	Q_1 (m ³ /s) = 2	Q_2 (m ³ /s) = 330,50	Q_3 (m ³ /s) = 27,00	$a = 1,42$	$a = 0,03$	



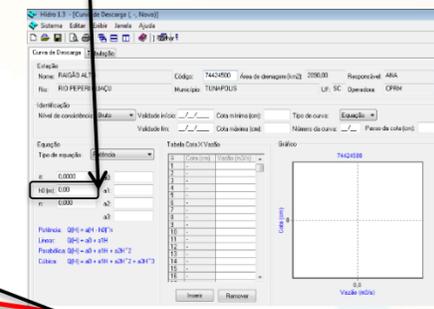
Método de JOHNSON (Método Analítico): Alterando o coeficiente **n** da equação potencial

Atenção: Nota-se que modificando o coeficiente n também se modifica o coeficiente a , já que, também, além da cota, o coeficiente a é função do coeficiente n . Contudo, se força-se o coeficiente a para permanecer constante, copiando-o e não deixando-o permanecer em função de n , nota-se que mesmo na base da relação h_1 e Q_1 do gráfico, há modificação do posicionamento da curva-chave, transferindo o eixo de rotação para baixo da relação h_1 e Q_1 , ou seja, o eixo de rotação é transferido para uma cota inferior $h_1 a$ e uma vazão menor que Q_1 .

Restrição: O h_0 deve ser menor ou igual a menor cota, do nível do rio, registrada para o intervalo de tempo de dados que se pretende traçar e/ou ajustar a curva-chave, ou menor ou igual a cota mais baixa do tramo, no caso da curva-chave ser dividida em dois ou mais tramos. Devido ao h_0 estar ligado a leitura da régua, que é em metros, e a régua ser com graduação centimétrica, o h_0 deve ser com duas casas decimais. Também existe o fato que o programa HIDRO da ANA, em 01/2019, utilizado para gerar vazão, permite inserir apenas duas casas decimais (0,00) no h_0 da equação potencial.

$$n = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{\log(h_1 - h_0) - \log(h_2 - h_0)}$$

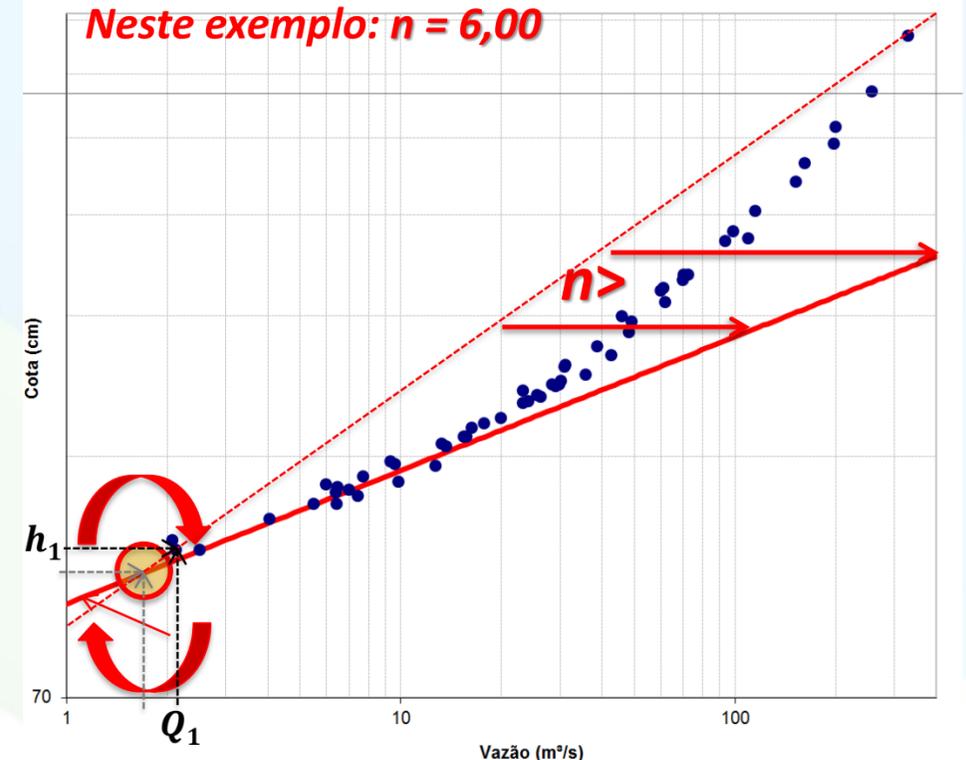
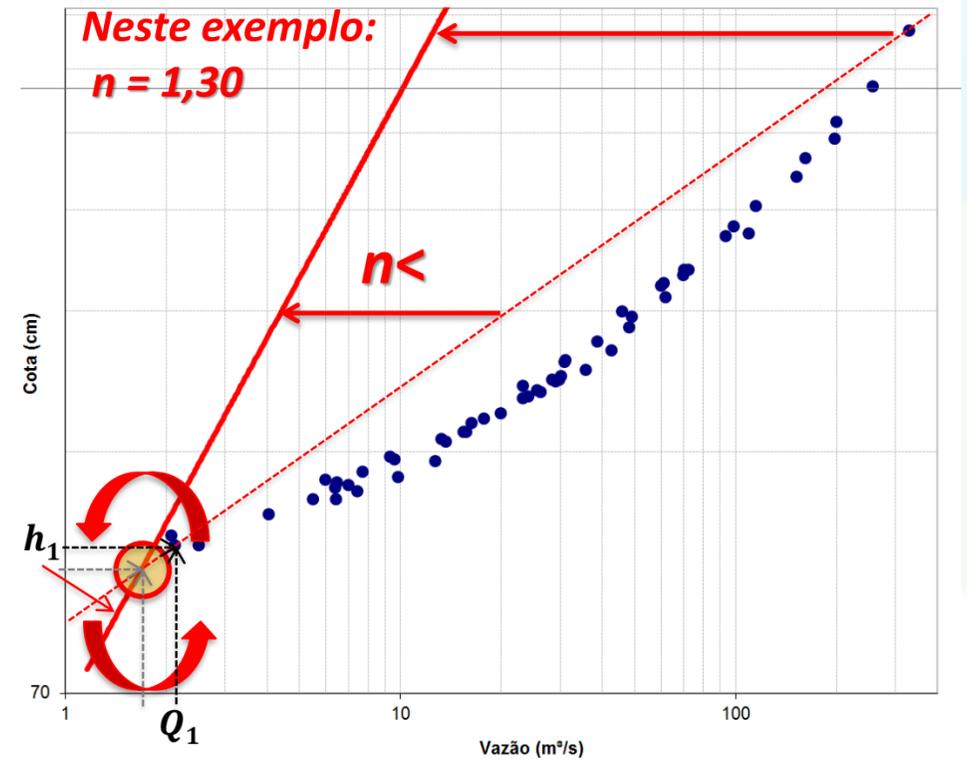
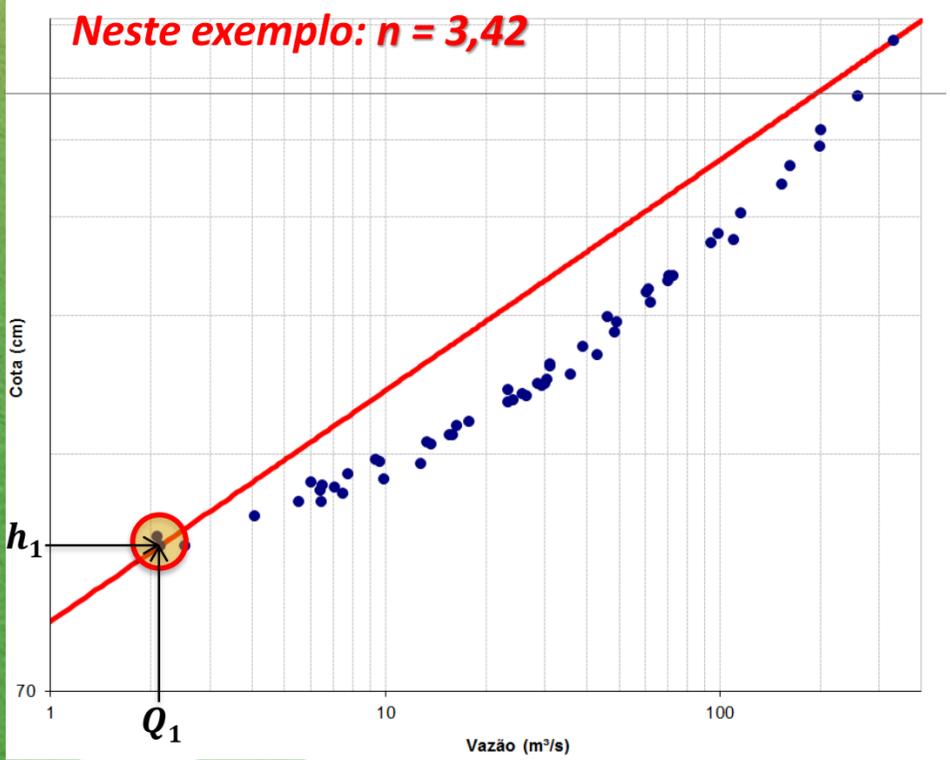
$$Q_{calculada} = a(h - h_0)^n$$



Johnson's Method						
01/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,42$	$a = 1,69$
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 1,69$	
02/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,41$	
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 1,69$	

Johnson's Method						
01/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 1,30$	$a = 44,32$
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 44,32$	
02/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,41$	
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 1,30$	

Johnson's Method						
01/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 6,00$	$a = 0,03$
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 0,03$	
02/02	h_1 (m) = 1,07	h_2 (m) = 4,69	h_3 (m) = 2,24	h_0 (m) = 0,00	$n = 3,41$	
	Q_1 (m³/s) = 2	Q_2 (m³/s) = 330,50	Q_3 (m³/s) = 27,00	$a = 1,69$	$a = 6,00$	



Considerações sobre o n da equação potencial

The relationship between rating curve parameters and physical conditions is also evident if the power and parabolic equations are compared with Manning's equation for determining discharges in steady flow situations. The Manning's equation can be given as:

$$Q_m = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} = \left(\frac{1}{n} S^{1/2}\right) (AR^{2/3}) \quad (6)$$

= function of (roughness & slope) & (depth & geometry)

Hence, the coefficients a, c and d are some measures of roughness and geometry of the control and b is a measure of the geometry of the section at various depths. **The value of coefficient b for various geometrical shapes are as follows:**

For rectangular shape:	about 1.6
For triangular shape :	about 2.5
For parabolic shape :	about 2.0
For irregular shape :	1.6 to 1.9

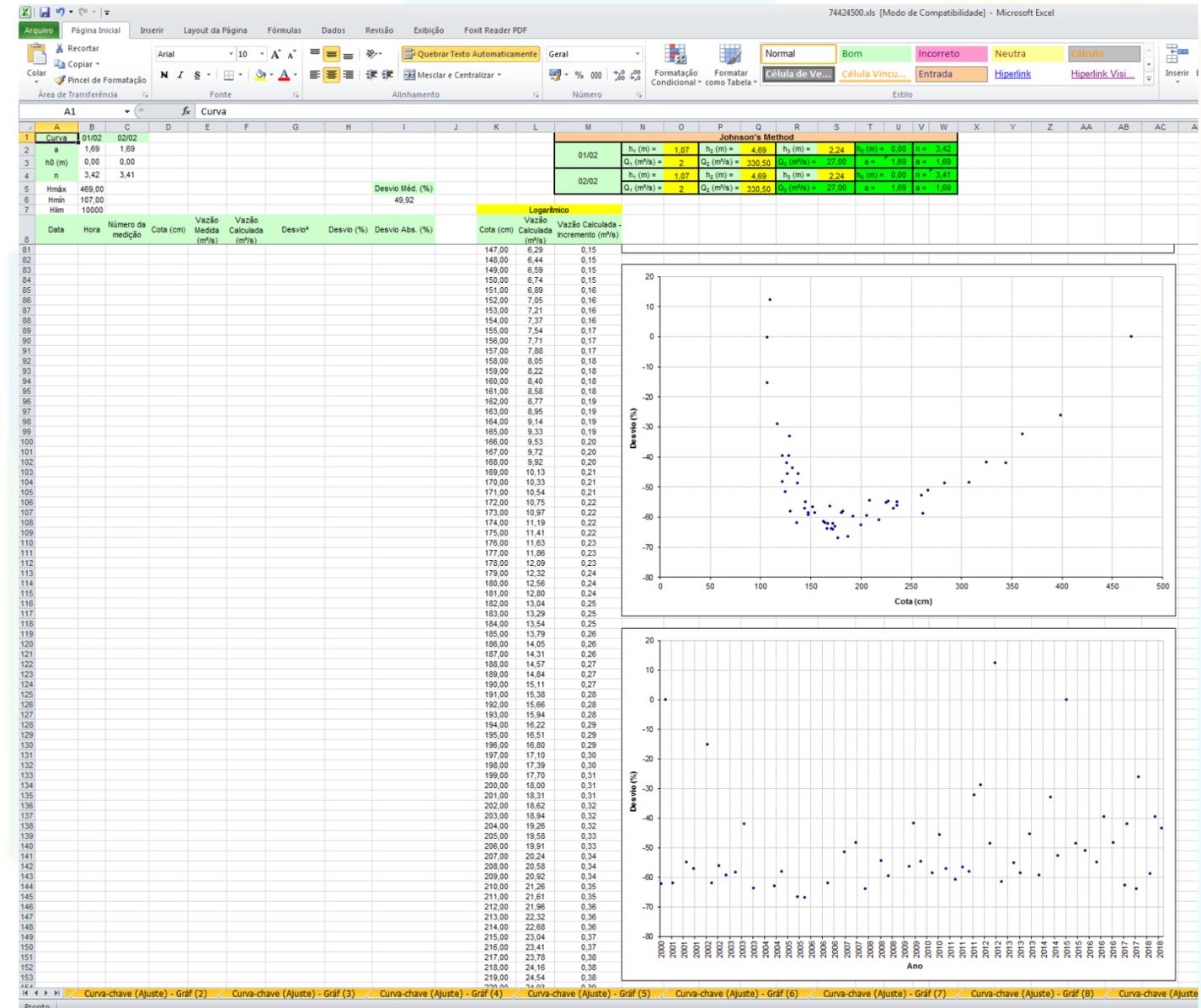
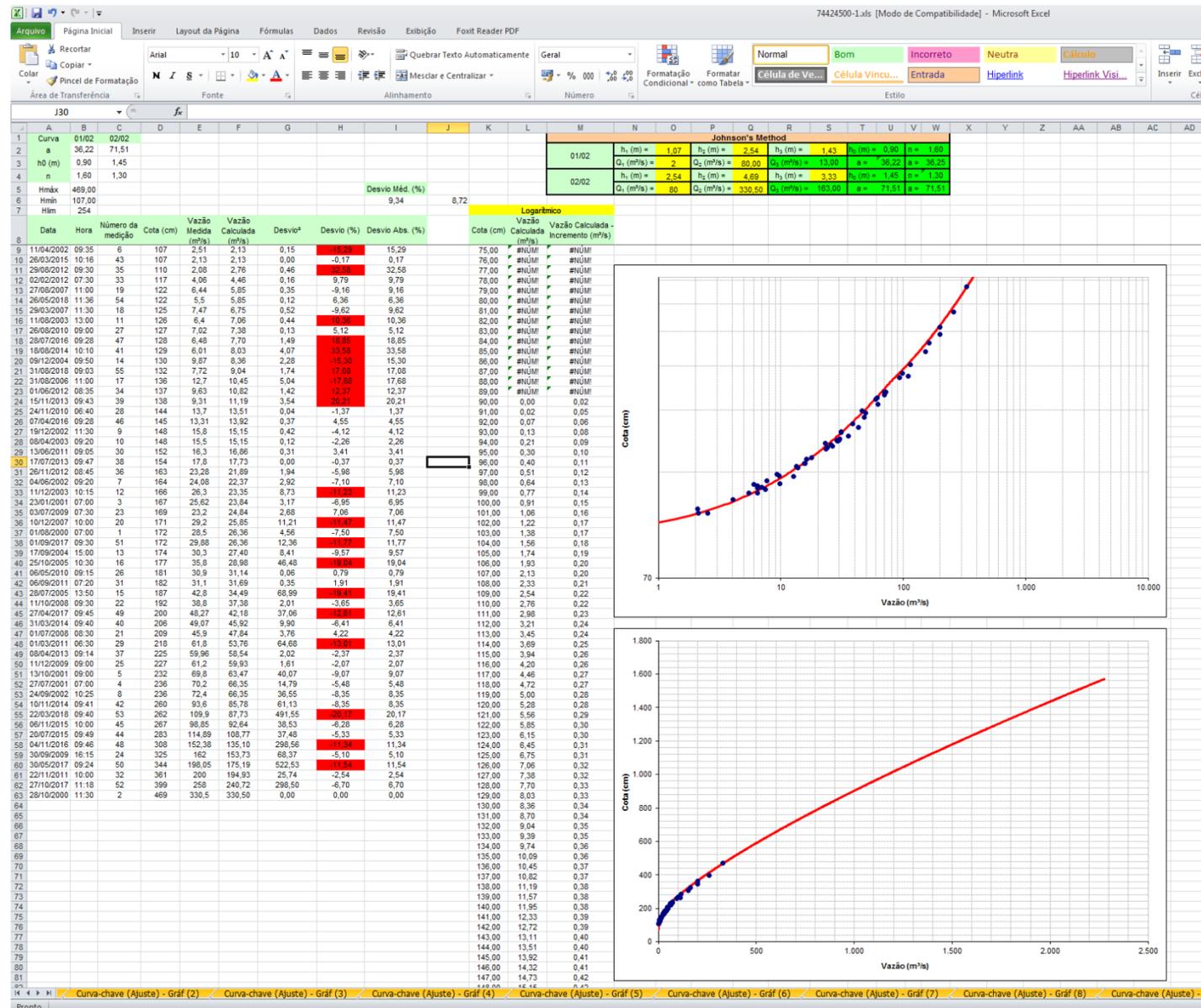
Changes in the channel resistance and slope with stage, however, will affect the exponent b. The net result of these factors is that the exponent for relatively wide rivers with channel control will vary from about 1.3 to 1.8. For relatively deep narrow rivers with section control, the exponent will commonly be greater than 2 and sometimes exceed a value of 3. Note that for compound channels with flow over the floodplain or braided channels over a limited range of level, very high values of the exponent are sometimes found (>5).

Fonte:

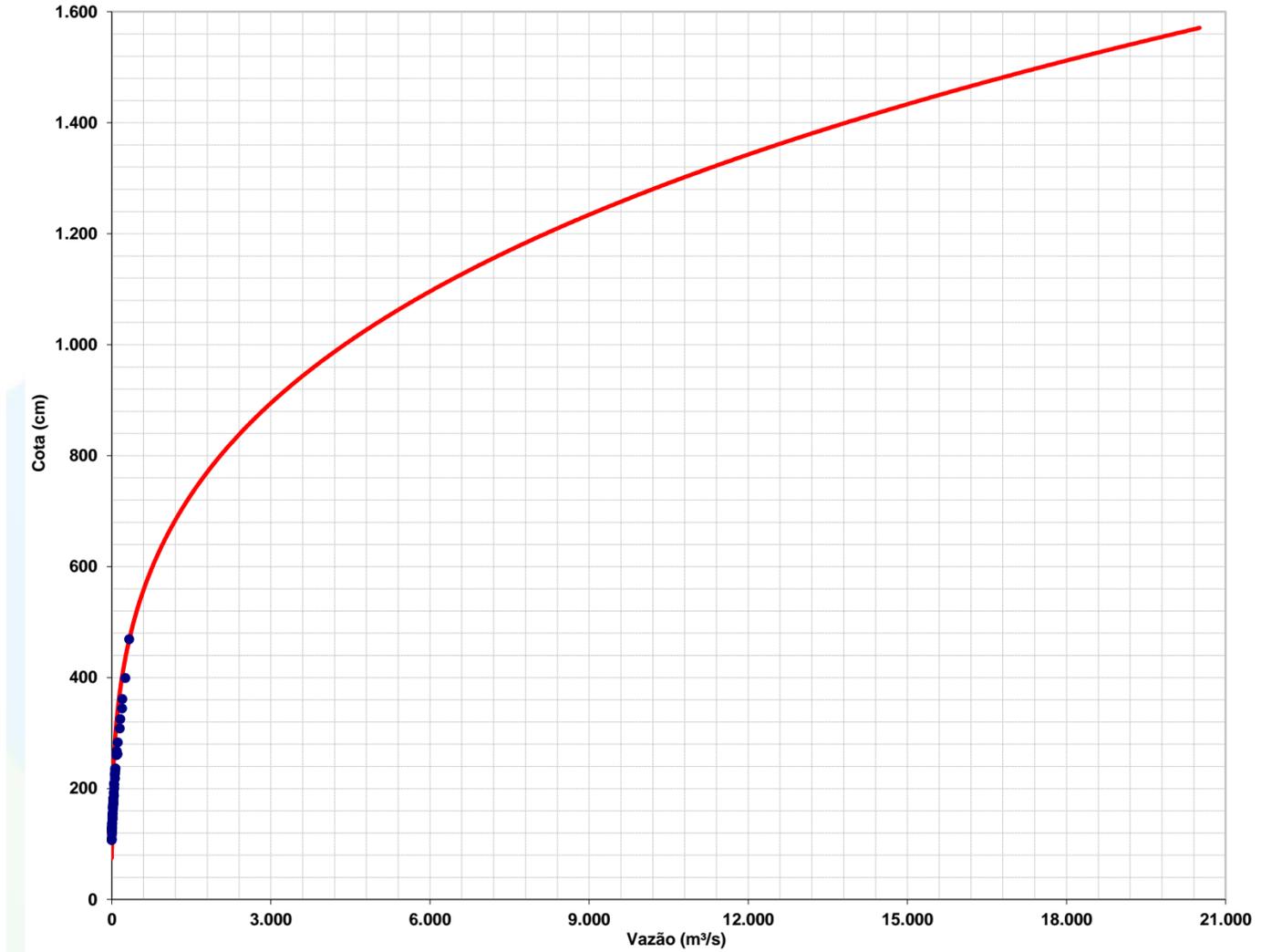
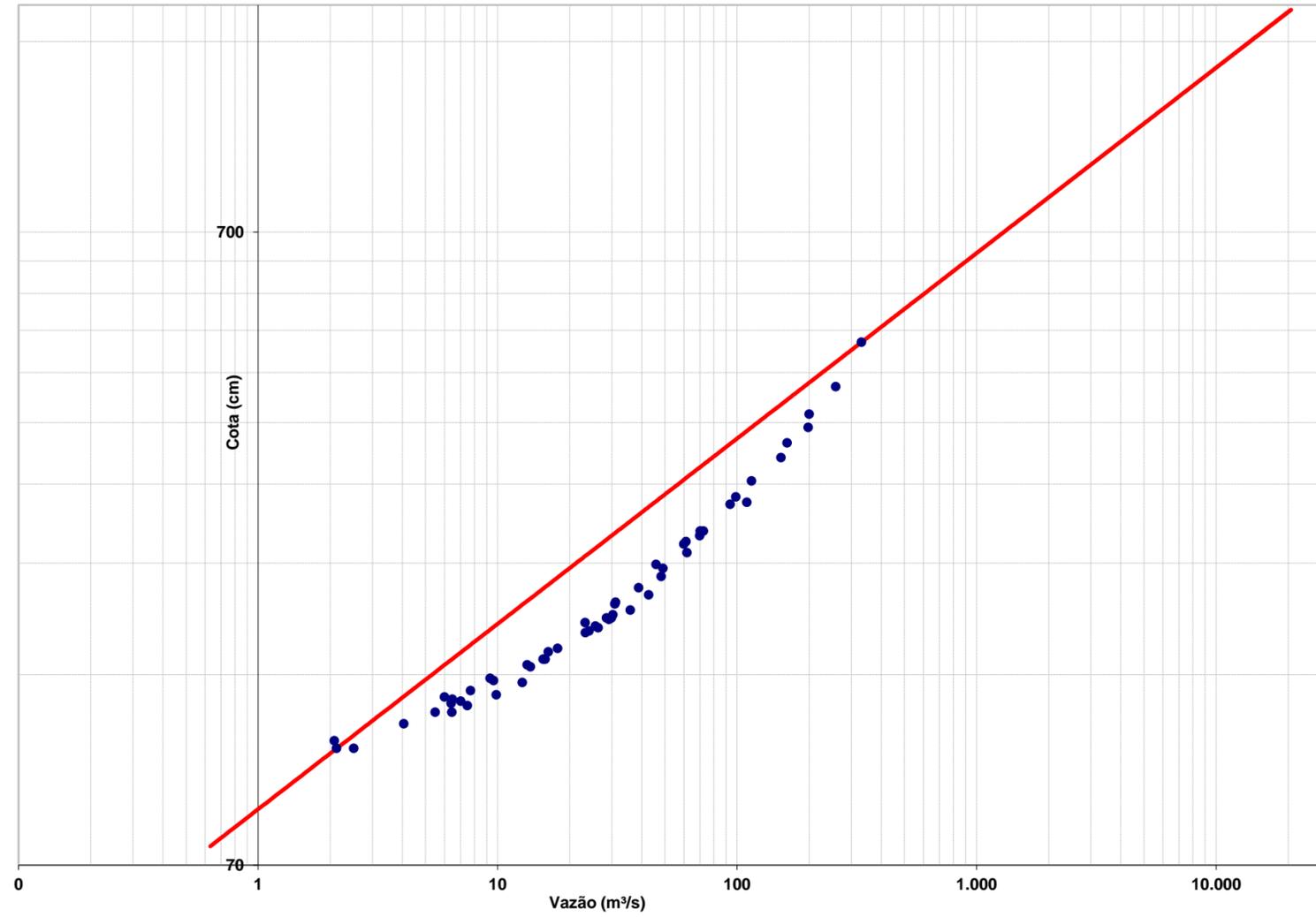
INDIA. **How to establish stage discharge rating curve.** Training module # SWDP – 29. New Delhi: Hydrology Project, 1999.

Método Johnson

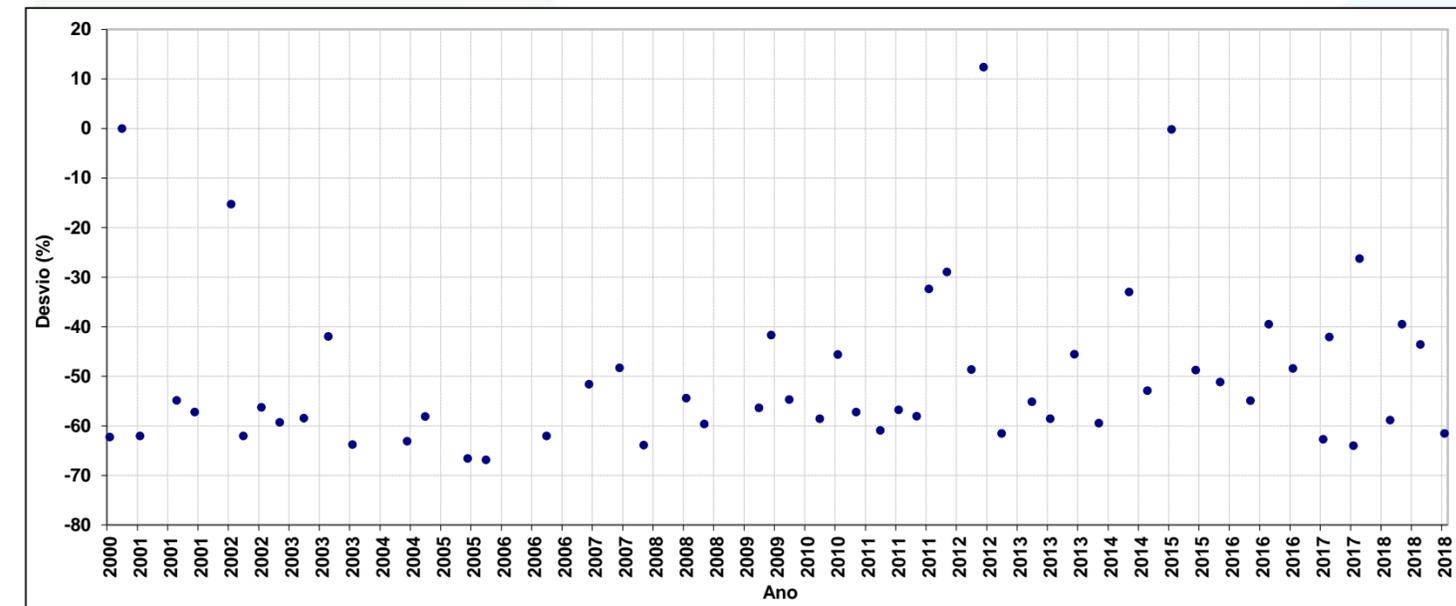
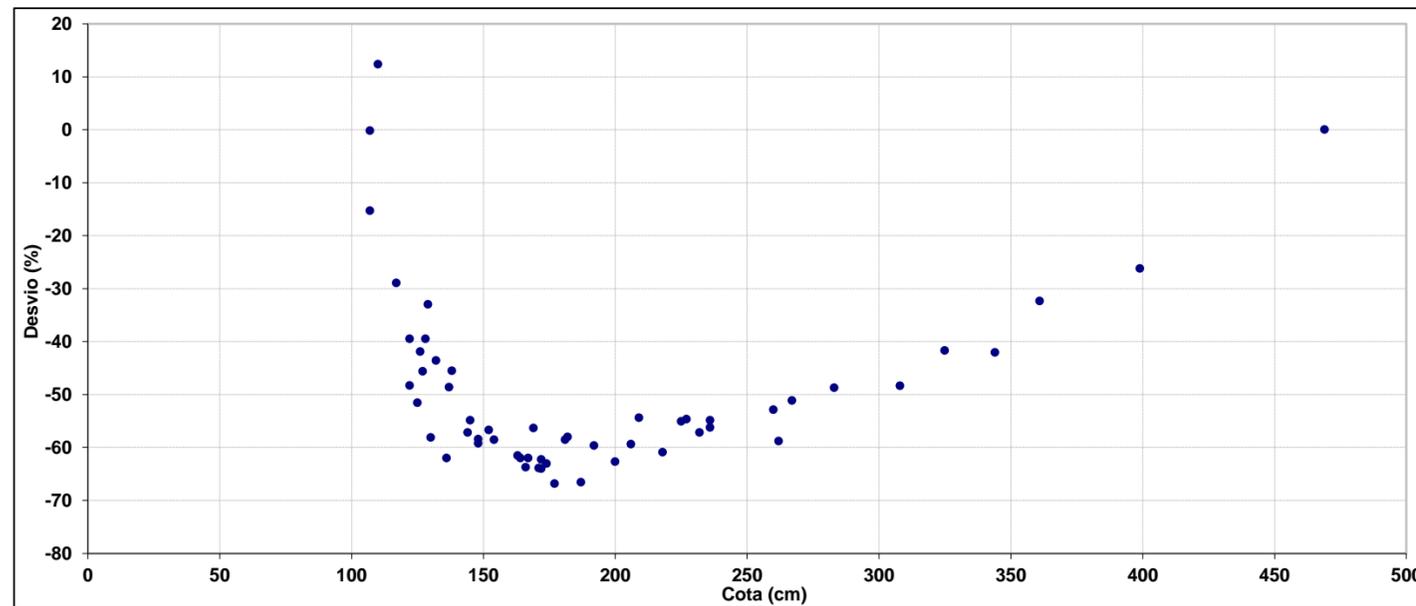
SGB-CPRM



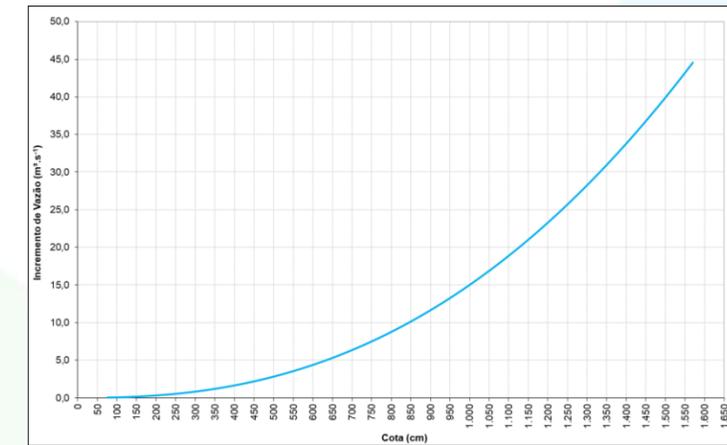
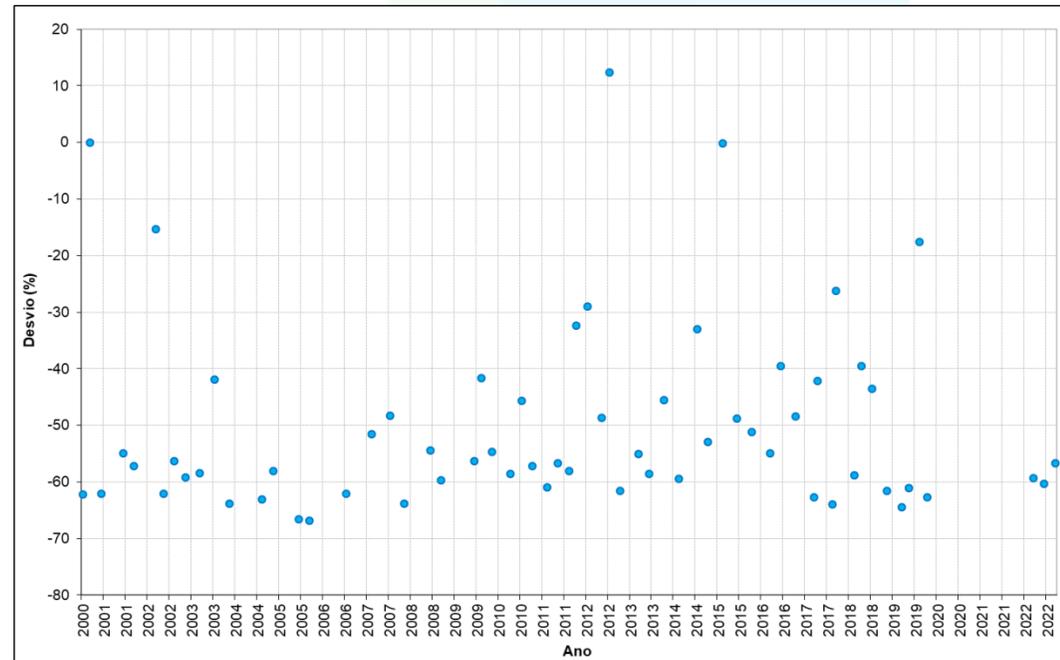
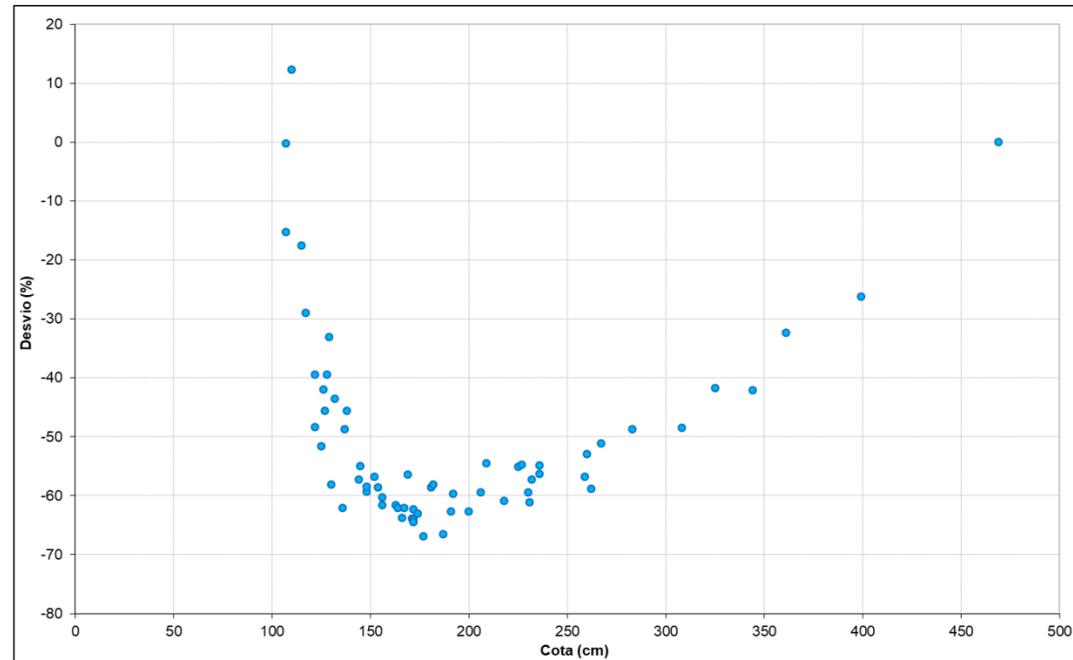
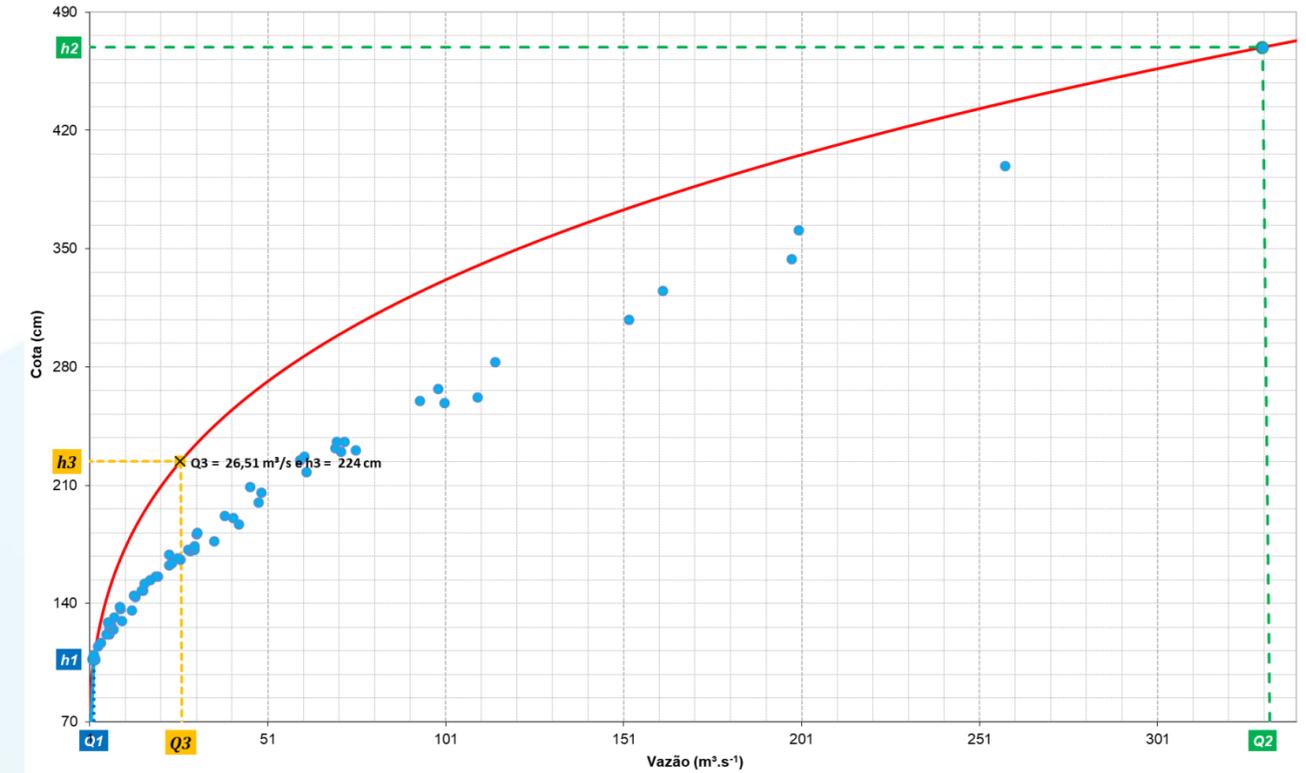
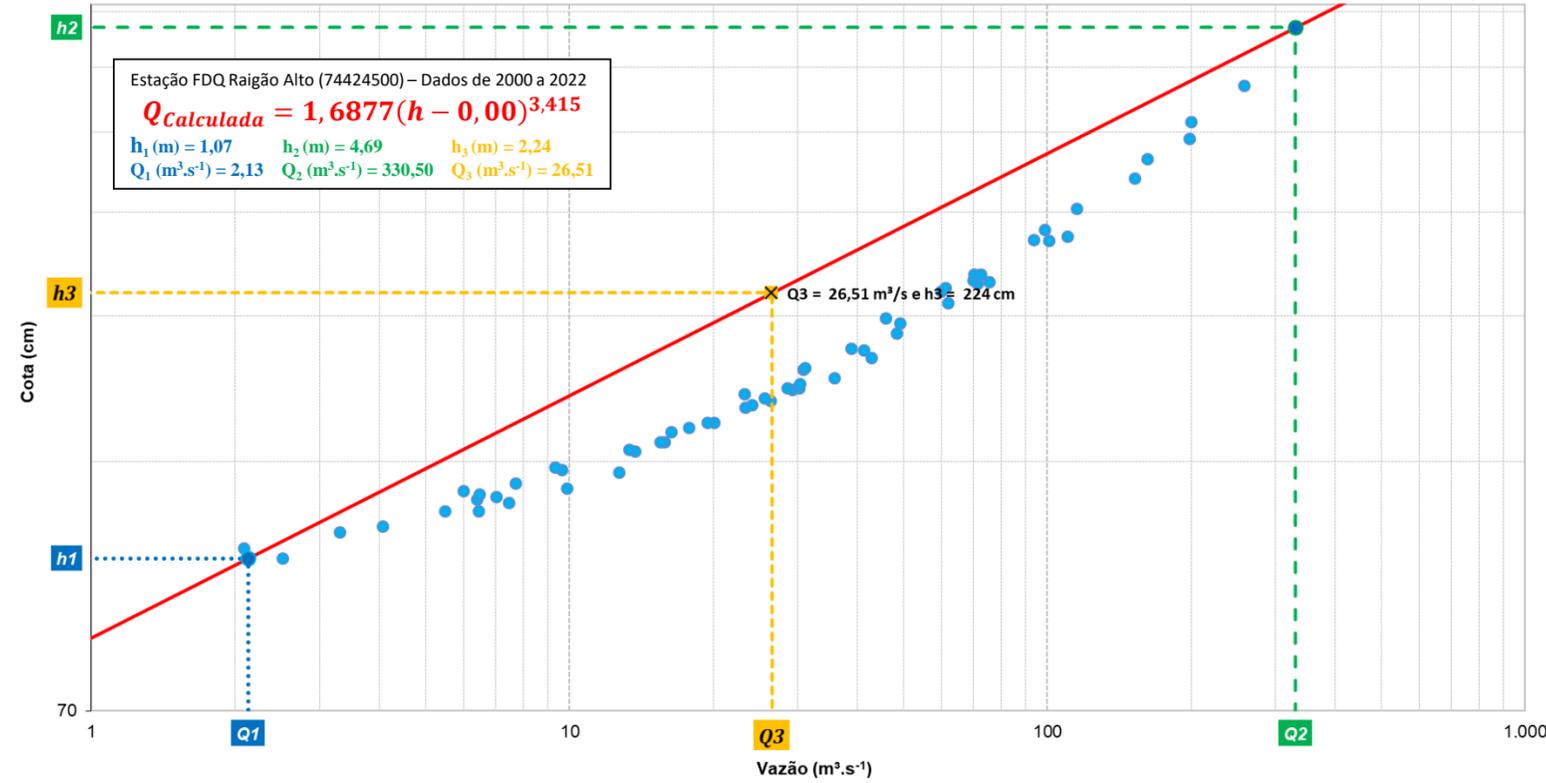
Traçado inicial pelo método de Johnson



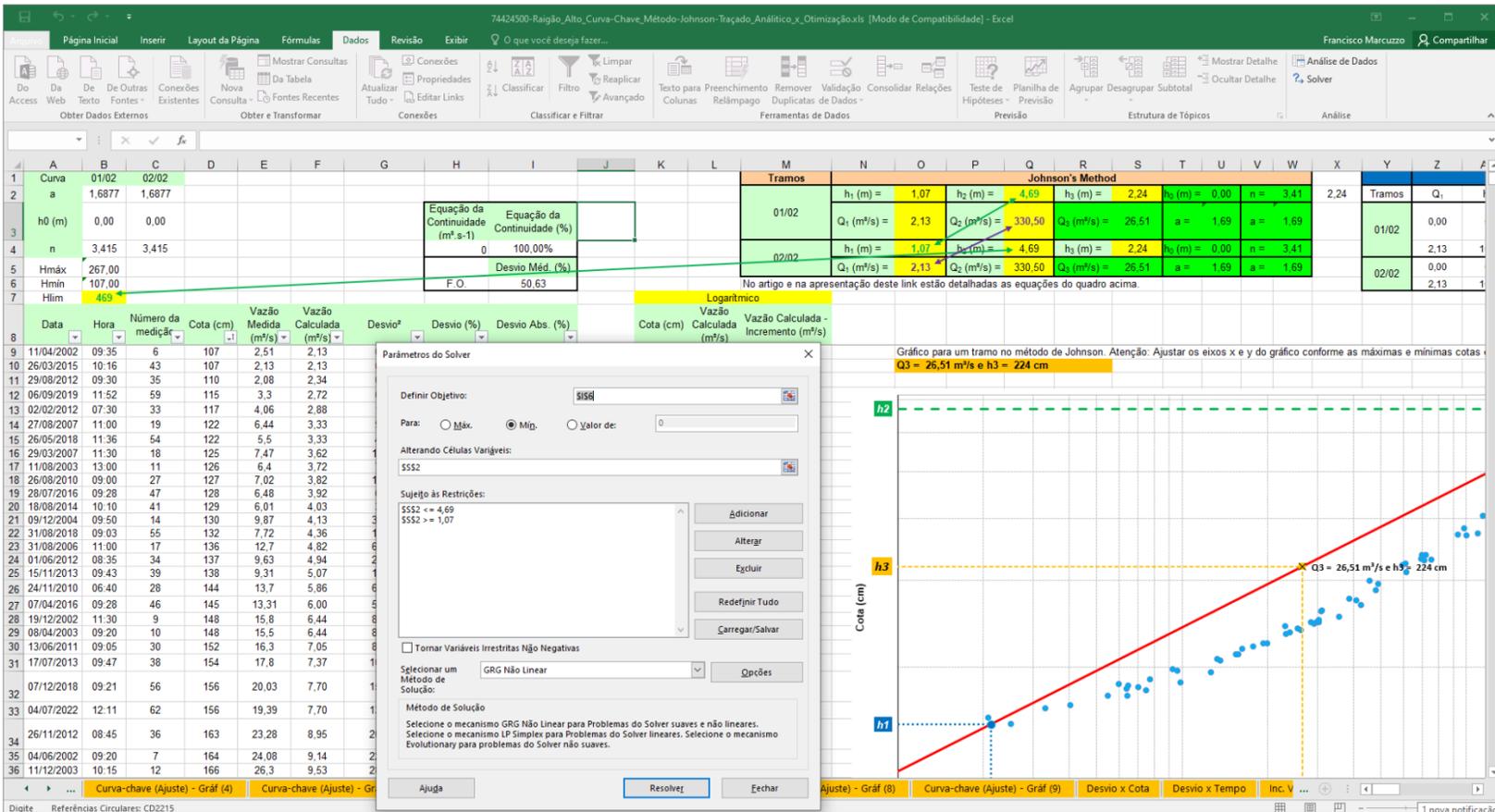
Desvio versus cota e Desvio versus Tempo



Resultado inicial do algoritmo de Johnson para um único tramo



SGB-CPRM



Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para: Máx. Mín. Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

- \$B\$2 <= 100
- \$B\$2 >= 0,0001
- \$B\$3 <= 1
- \$B\$3 >= -5
- \$B\$4 <= 5
- \$B\$4 >= 1,3
- \$C\$2 <= 100
- \$C\$2 >= 0,0001
- \$C\$3 <= 2,3
- \$C\$3 >= -5
- \$C\$4 <= 5
- \$C\$4 >= 1,3
- \$O\$2 <= 1,15

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução: Seleccione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Seleccione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Seleccione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Opções

Todos os Métodos | GRG Não Linear | Evolutionary

Convergência:

Derivativos: Encaminhar Central

Multi-inicialização: Usar Início Múltiplo

Tamanho da População:

Propagação Aleatória:

Limites Necessários em Variáveis

Opções

Todos os Métodos | GRG Não Linear | Evolutionary

Convergência:

Taxa de Mutação:

Tamanho da População:

Propagação Aleatória:

Tempo Máximo sem aperfeiçoamento:

Limites Necessários em Variáveis

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para: Máx. Mín. Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

- \$C\$3 >= -5
- \$C\$4 <= 5
- \$C\$4 >= 1,3
- \$O\$2 <= 1,15
- \$O\$2 >= 1
- \$O\$3 <= 2,4
- \$O\$3 >= 1,9
- \$Q\$2 <= 2,35
- \$Q\$2 >= 2,25
- \$Q\$3 <= 72
- \$Q\$3 >= 68
- \$S\$2 <= 2,35
- \$S\$2 >= 1

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Montagem da F.O. e Restrições

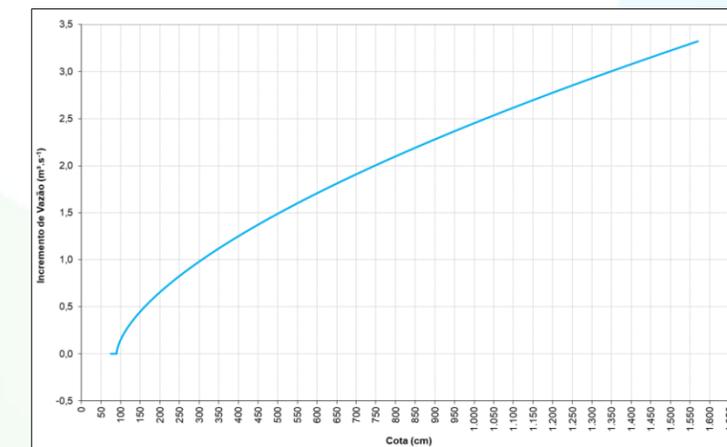
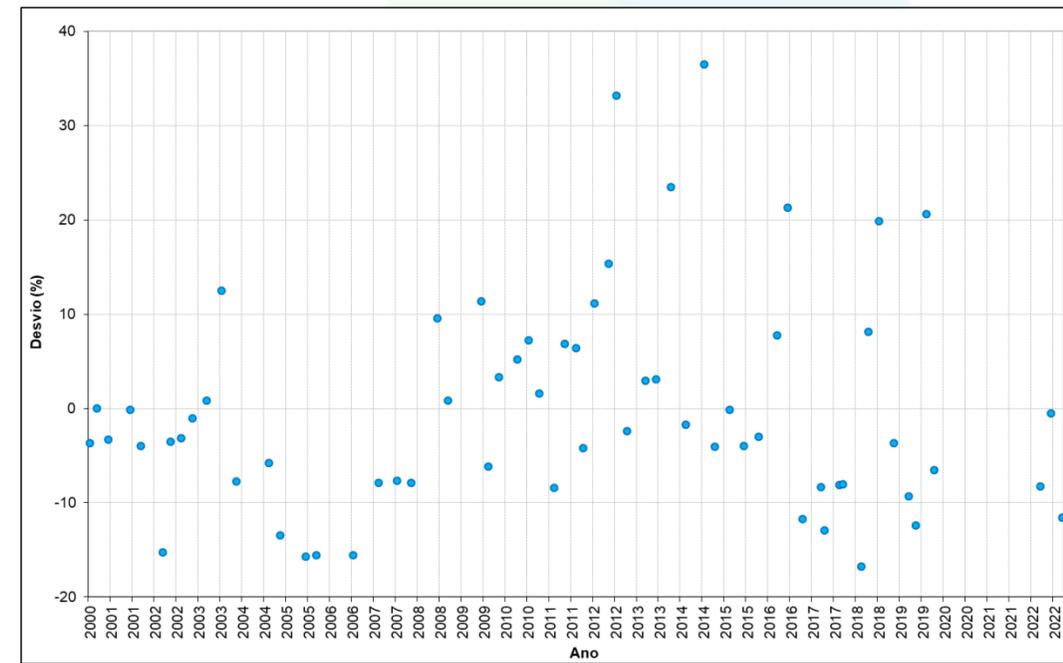
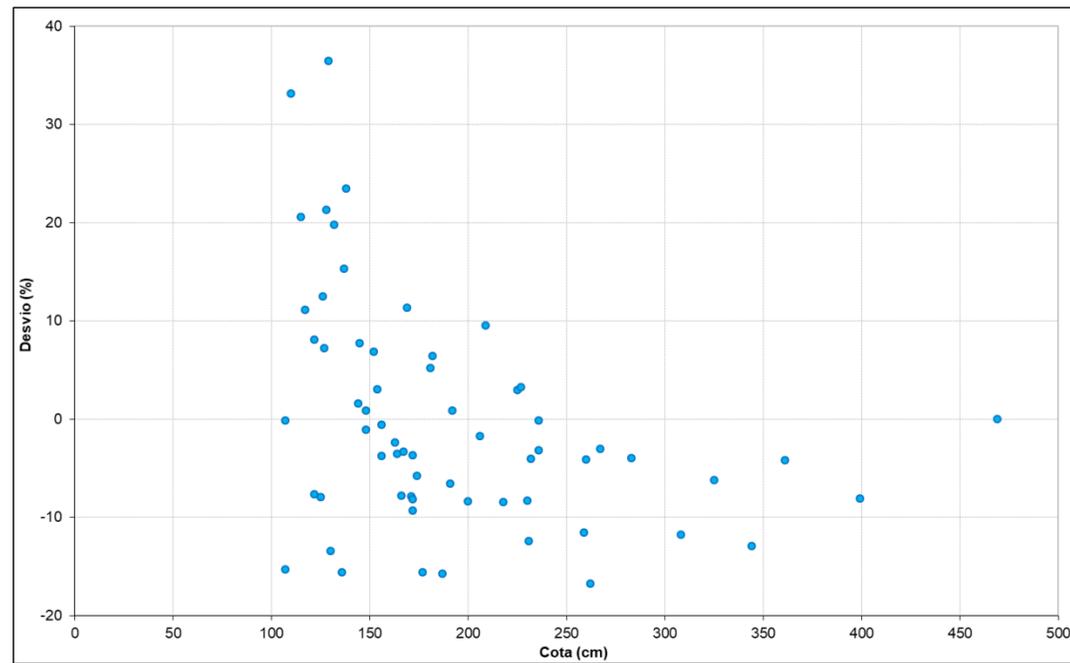
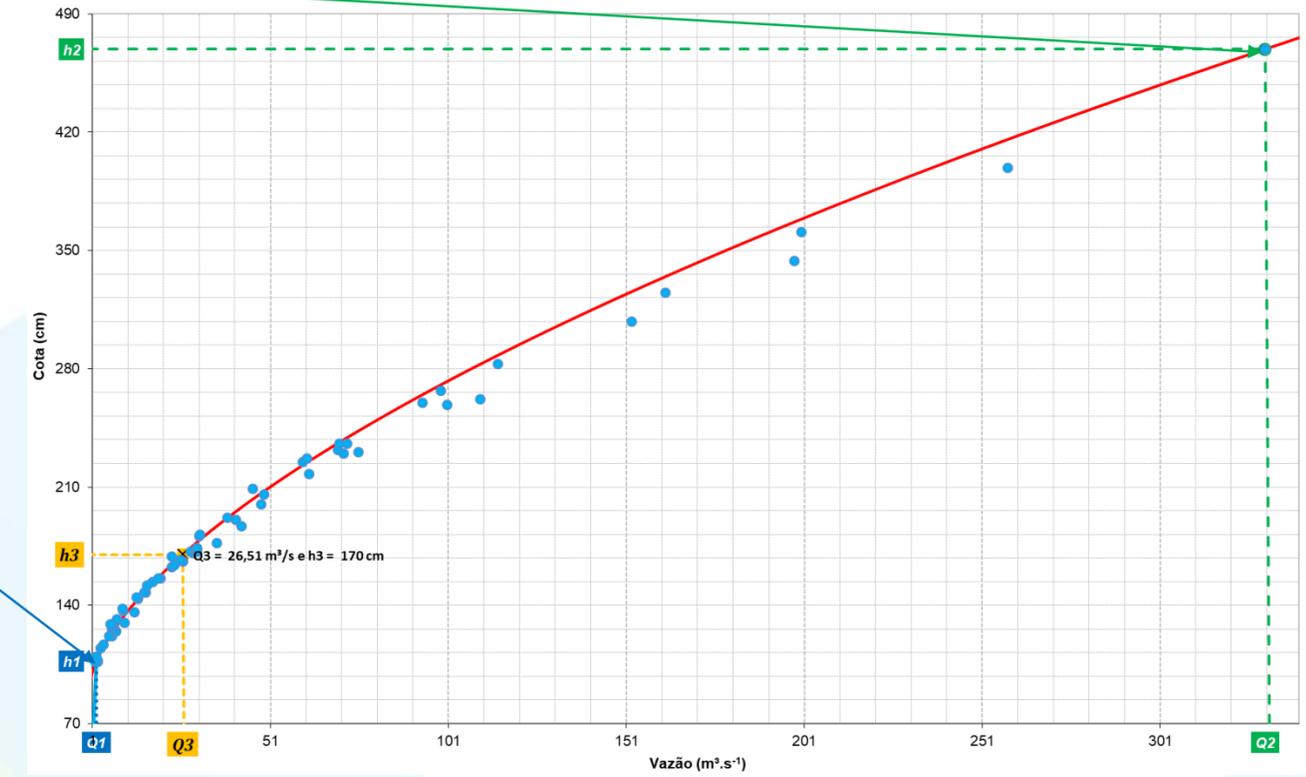
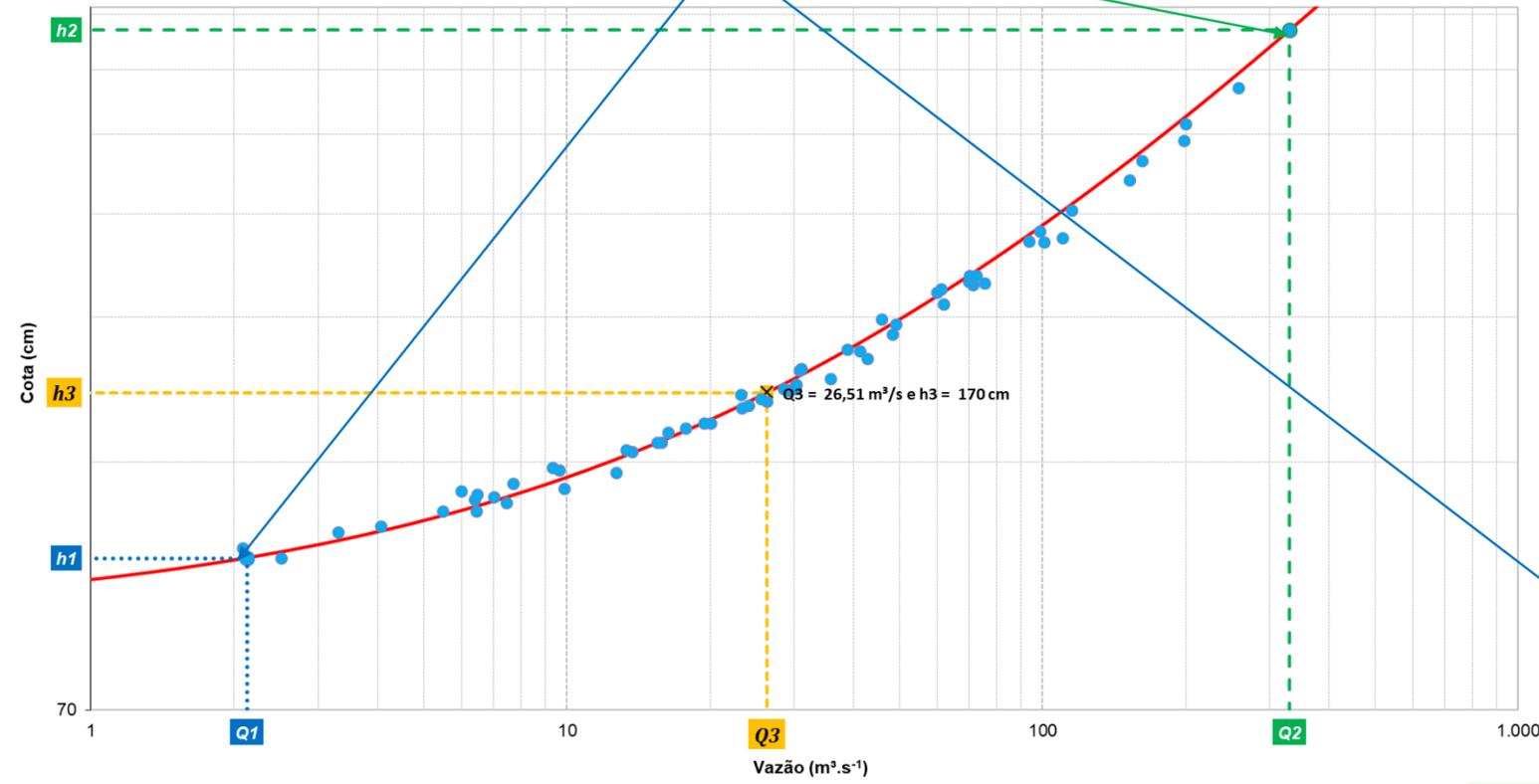
Erro na PMNL

Erros na PMNL

Sucesso no AG

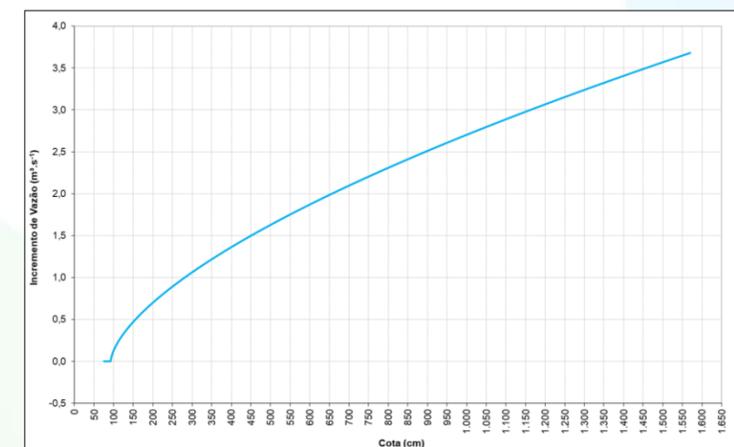
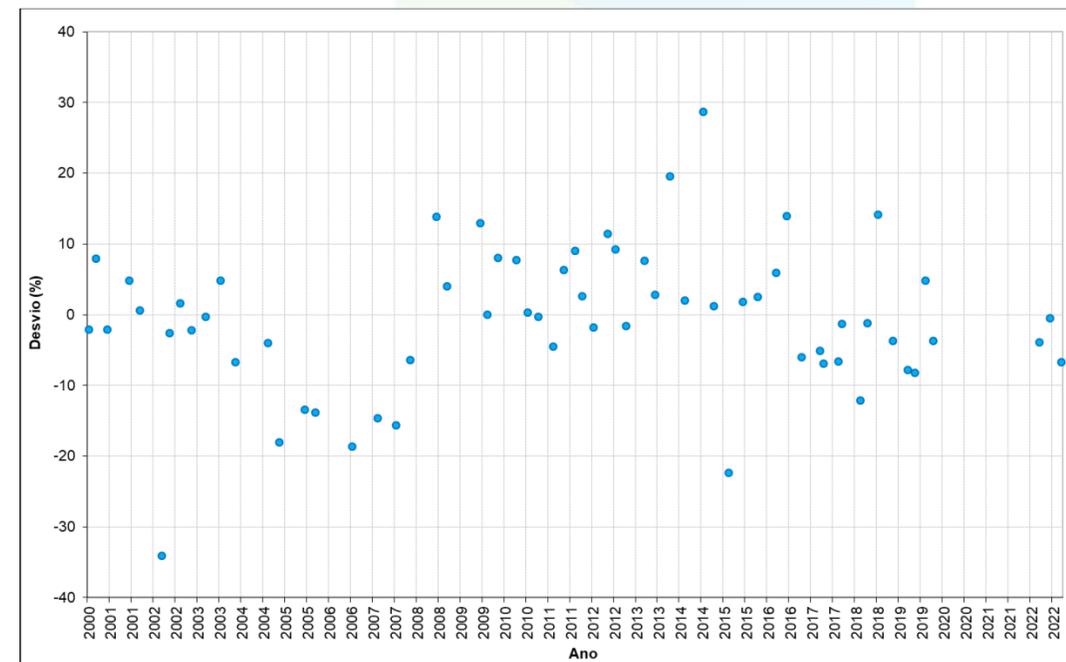
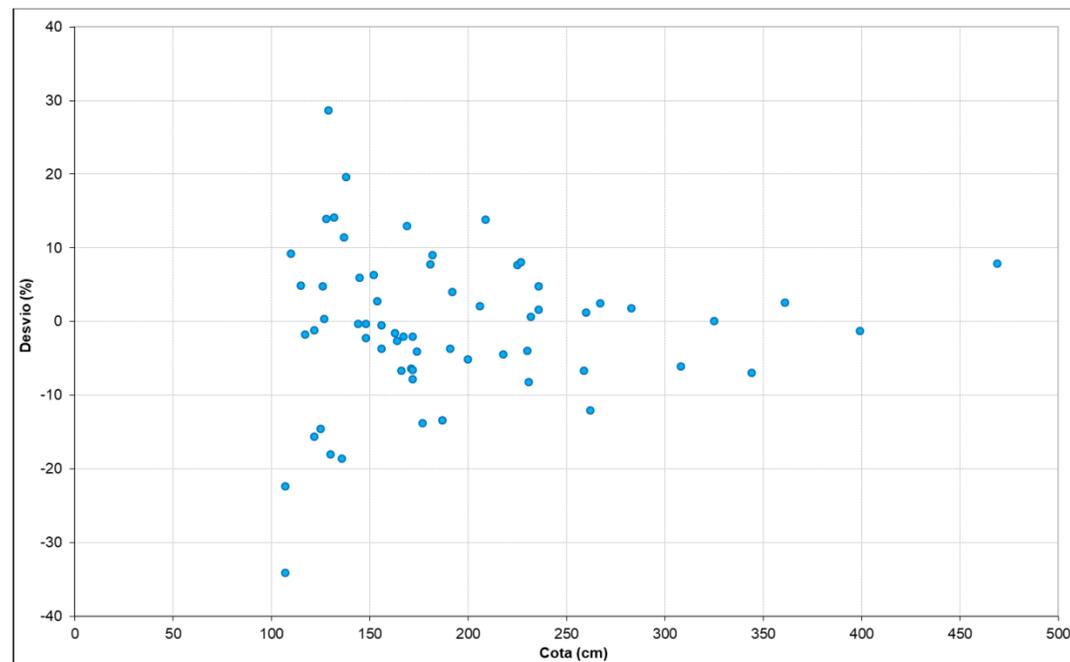
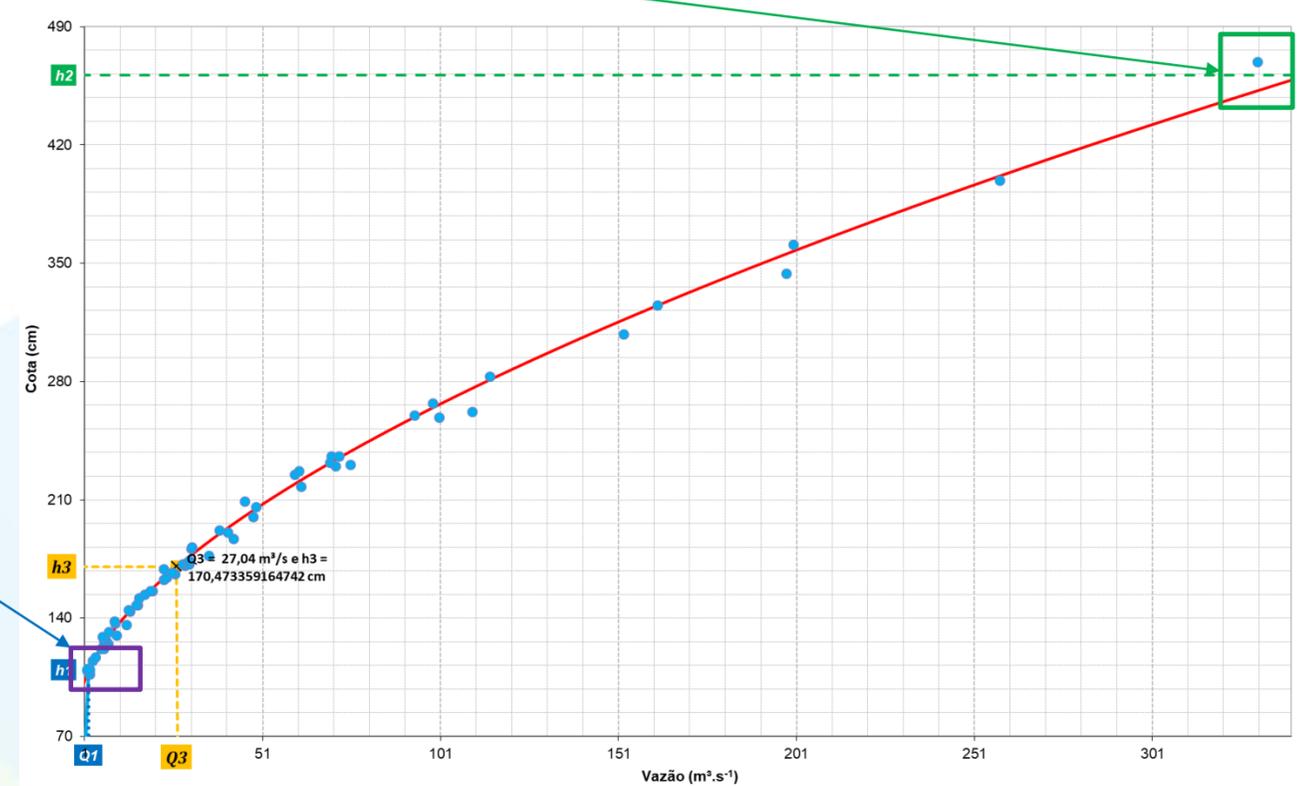
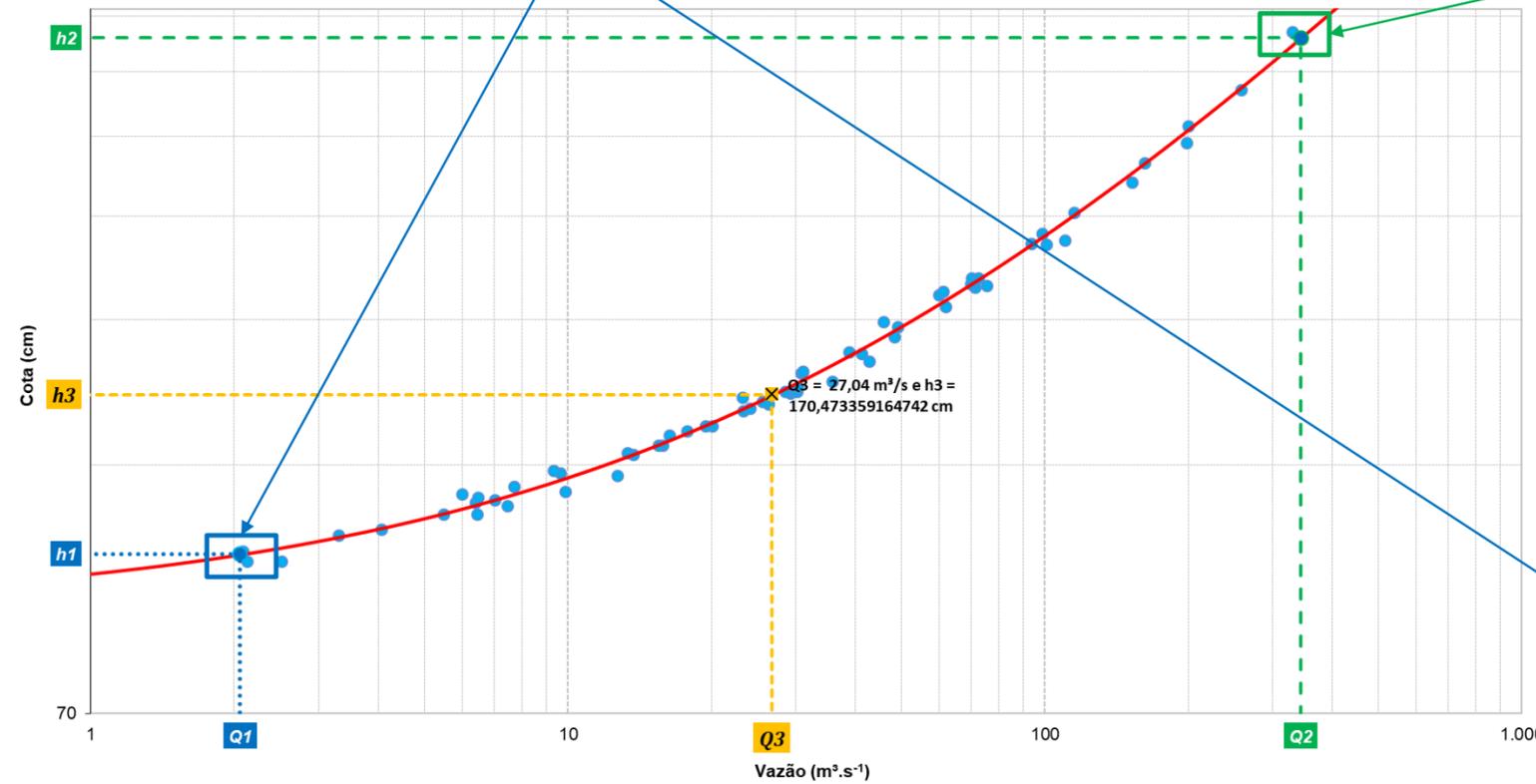
AG - Tramo Único:

Ajuste otimizado com os valores de h_1 , Q_1 , h_2 e Q_2 fixos, conforme a relação com a medição de vazão na menor e maior cota da série histórica estudada.

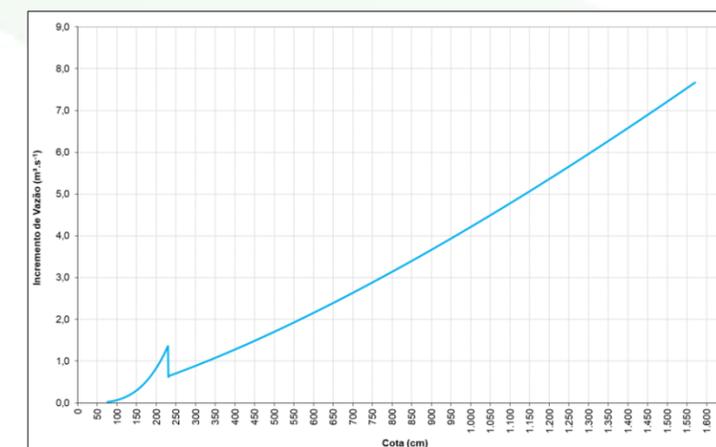
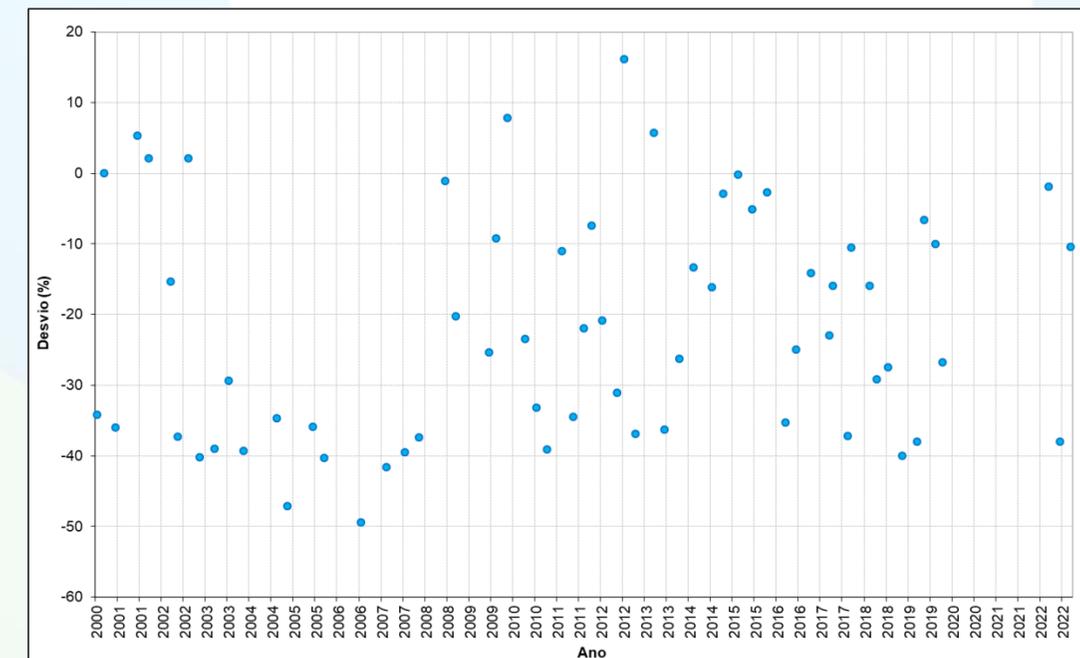
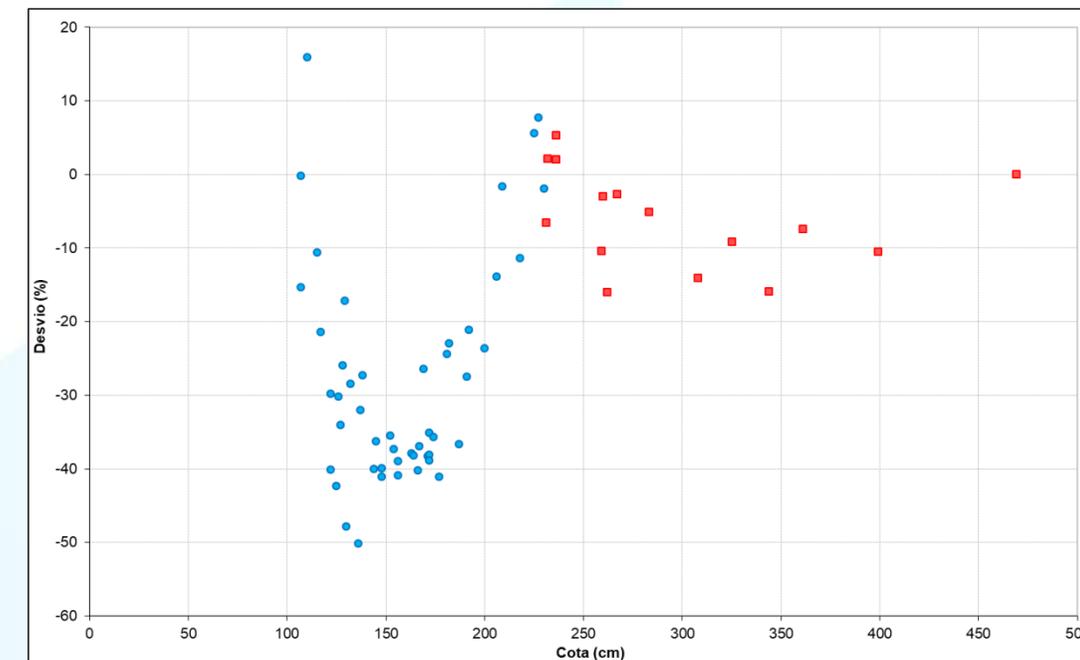
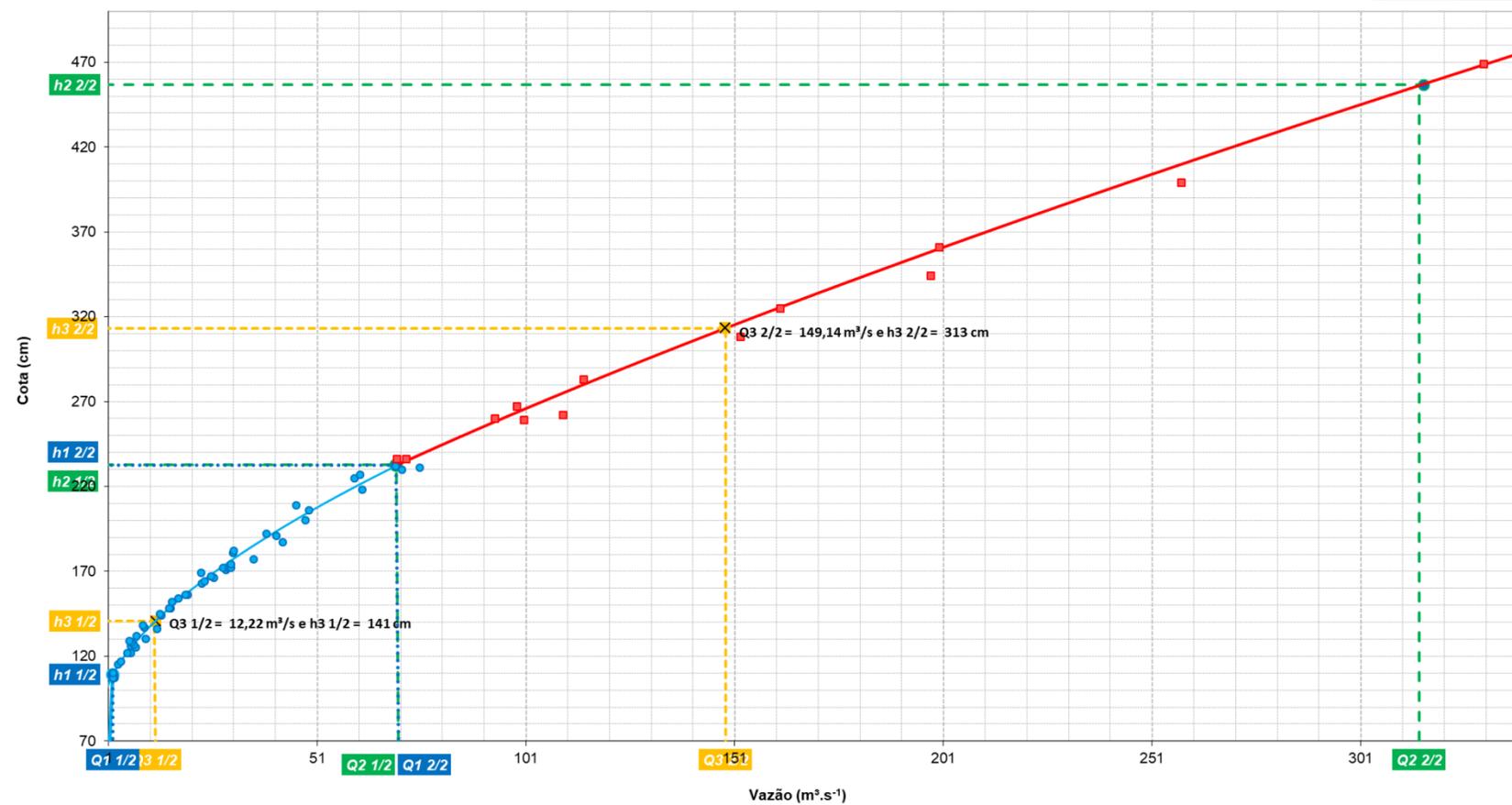
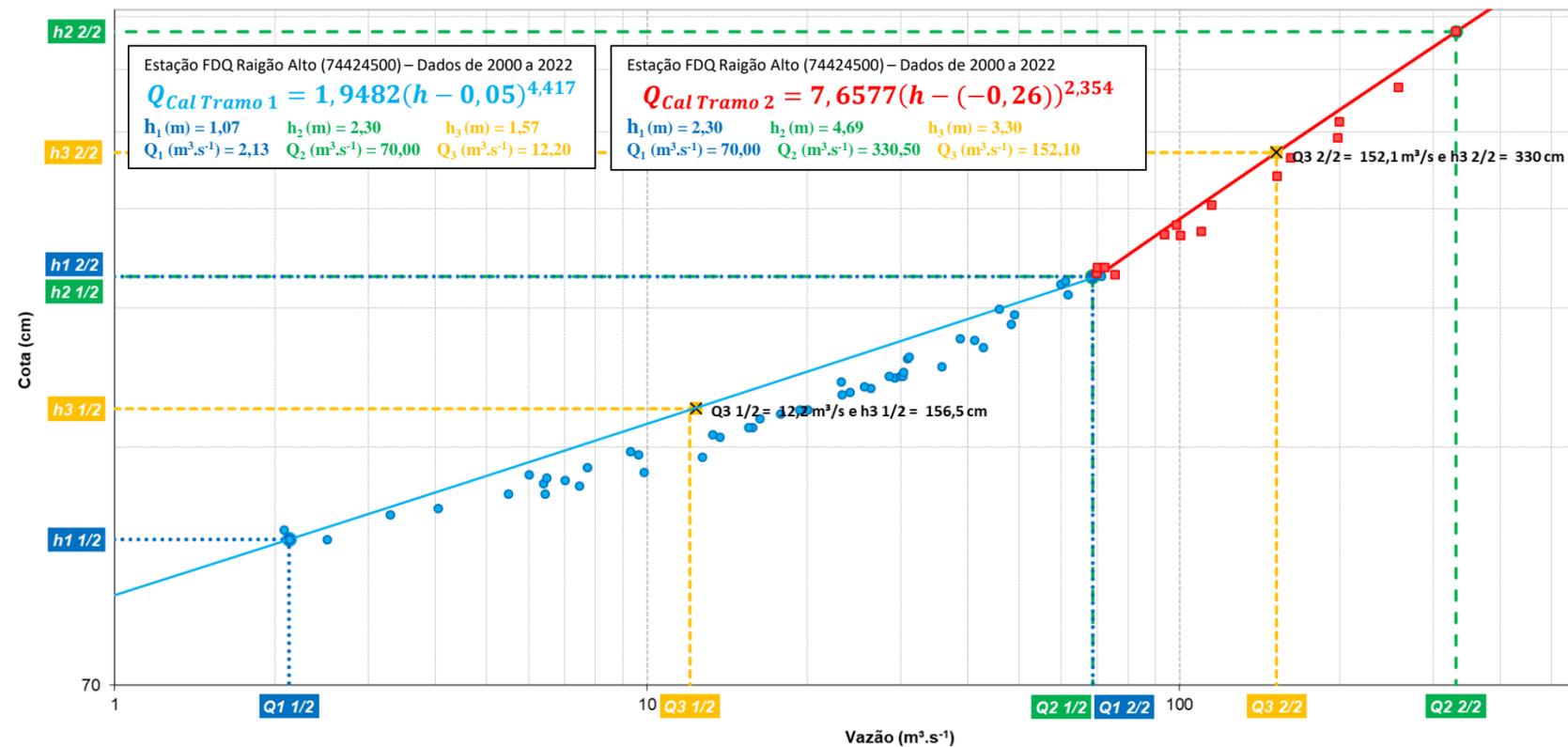


AG - Tramo Único:

h_1 , variando de 1,00 a 1,15 m. Q_1 , variando de 1,90 a 2,40 $m^3.s^{-1}$. h_2 , variando de 4,50 a 4,90 m. Q_2 , variando de 310 a 250 $m^3.s^{-1}$.

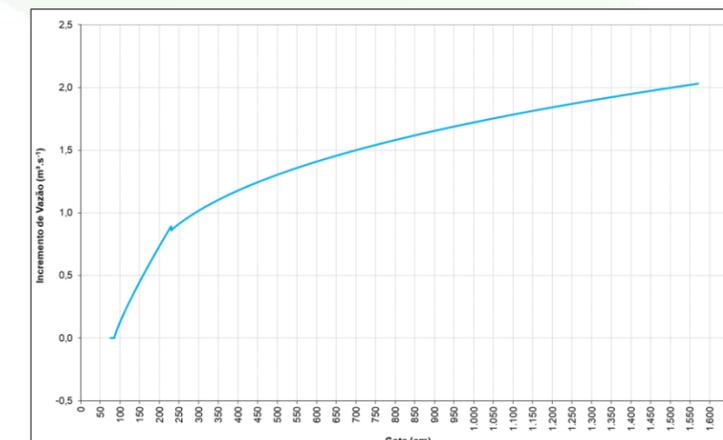
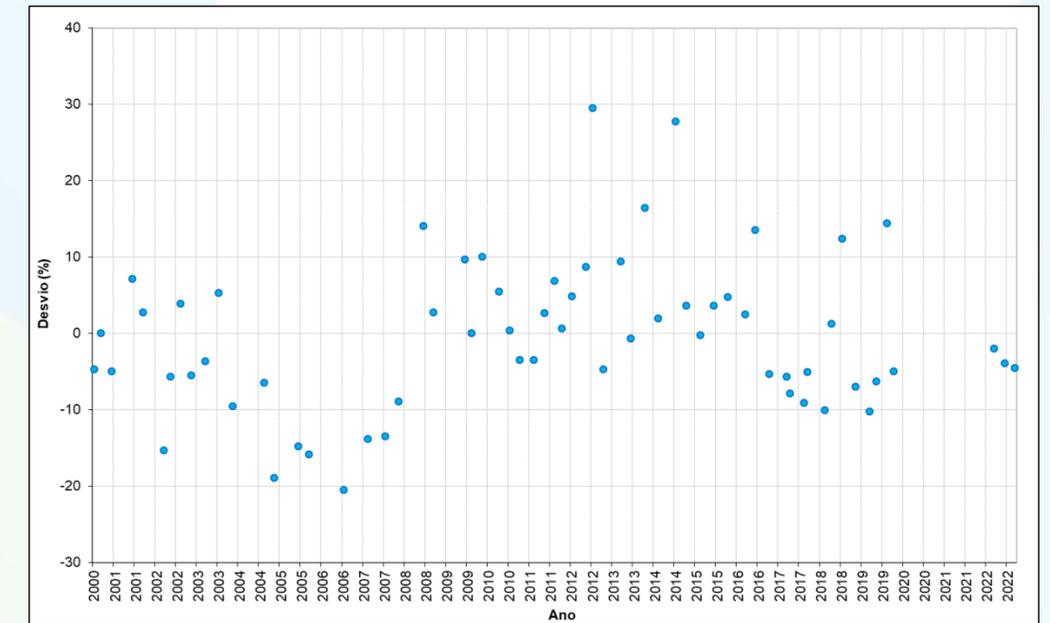
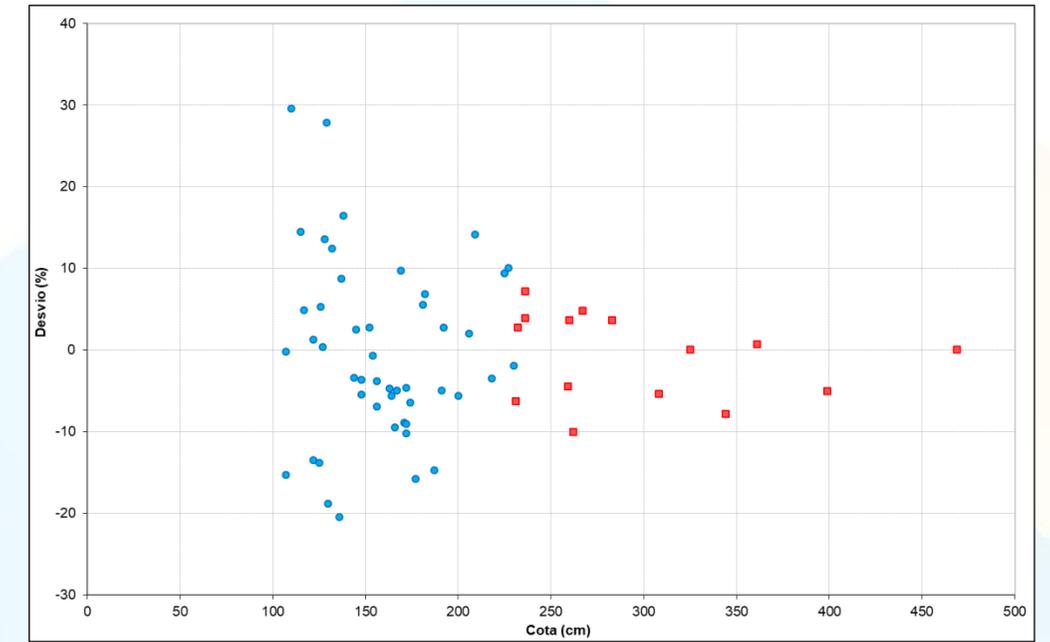
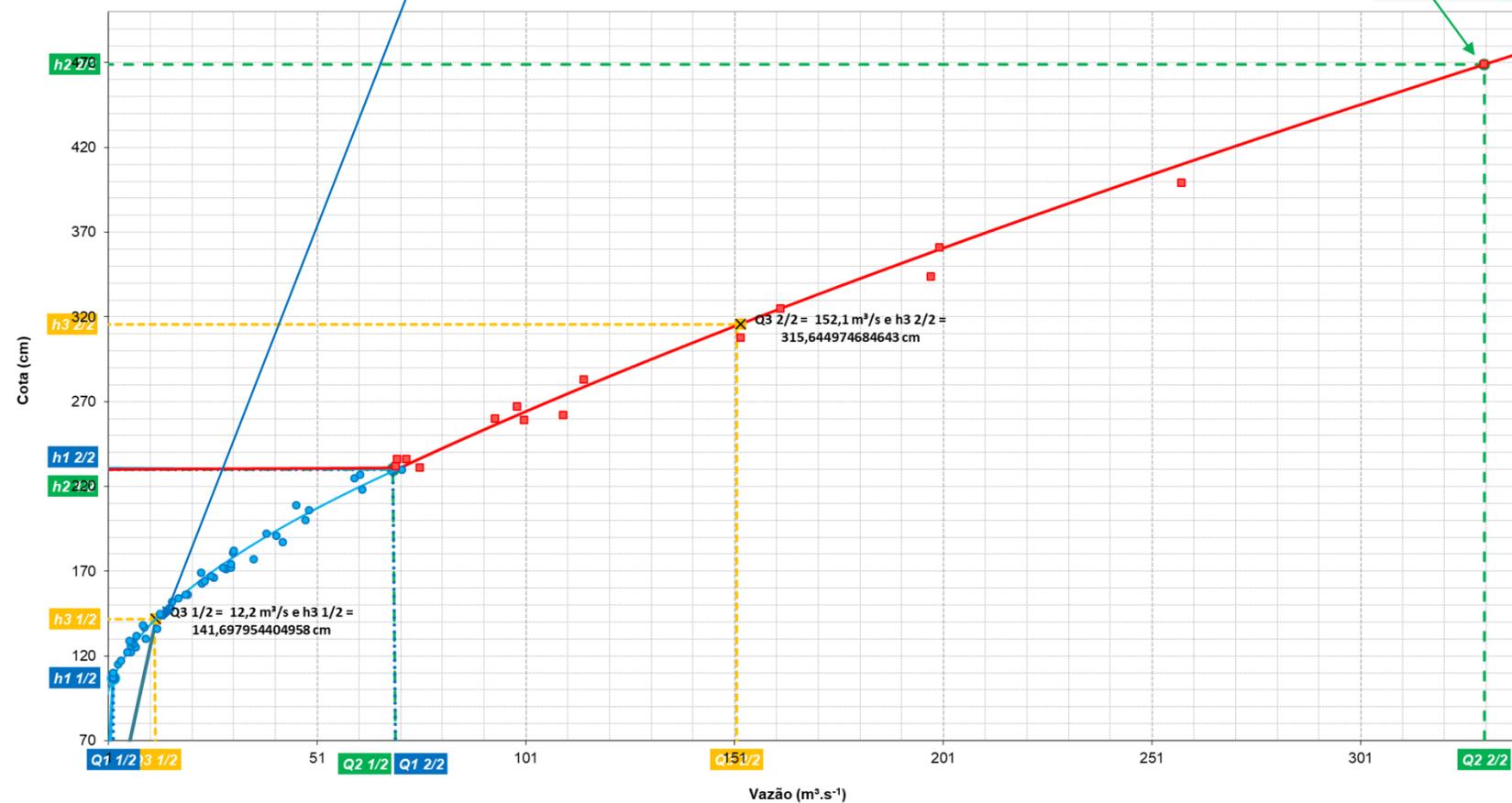
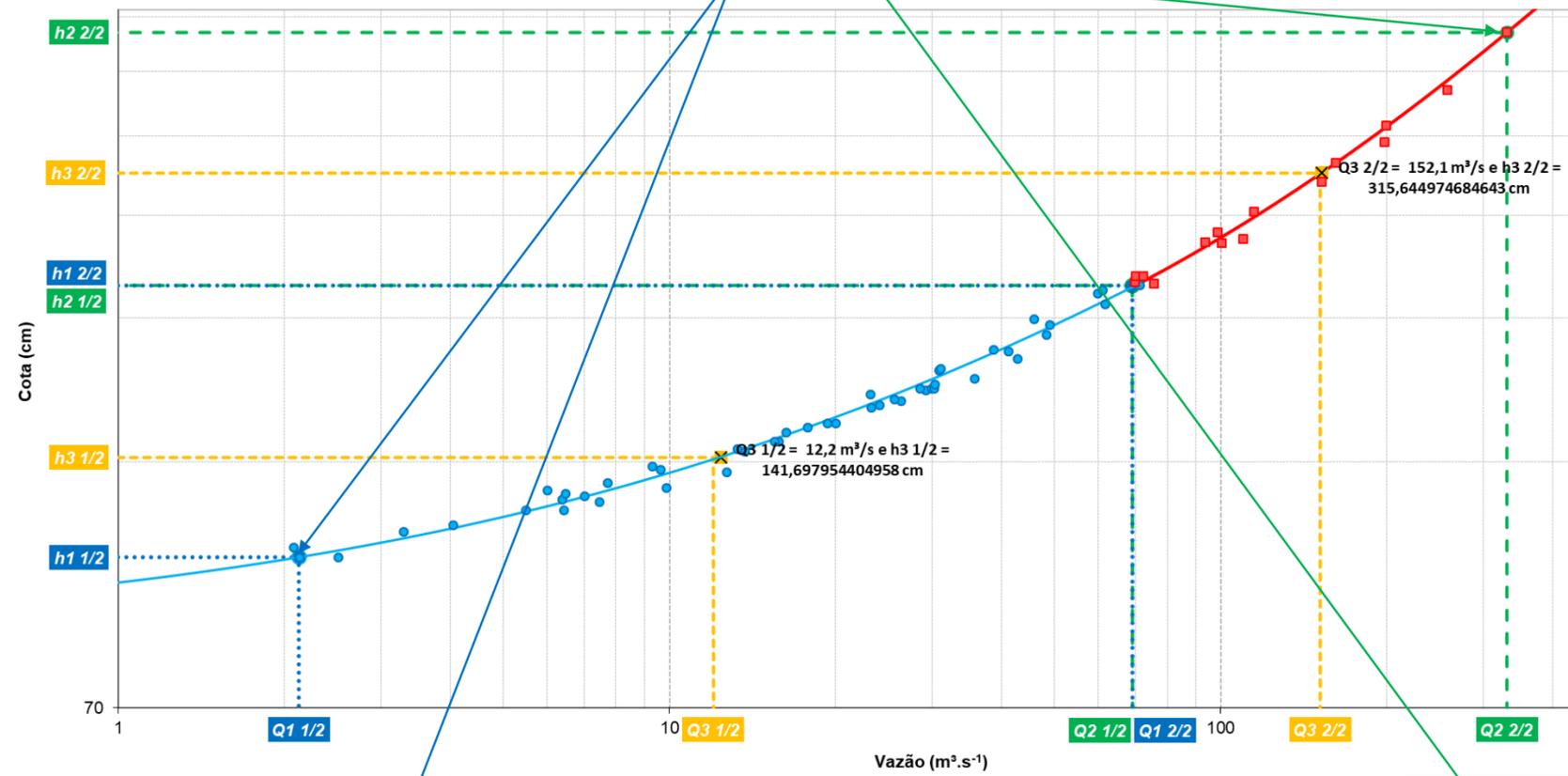


Resultado inicial do algoritmo de Johnson para dois tramos



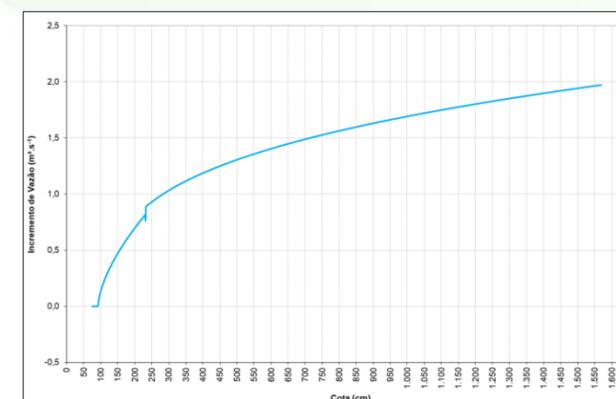
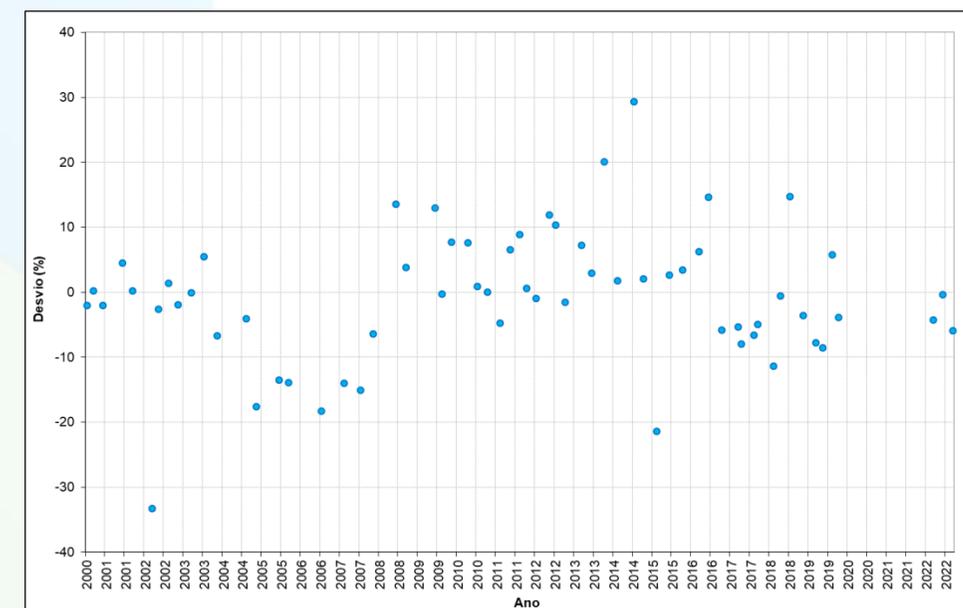
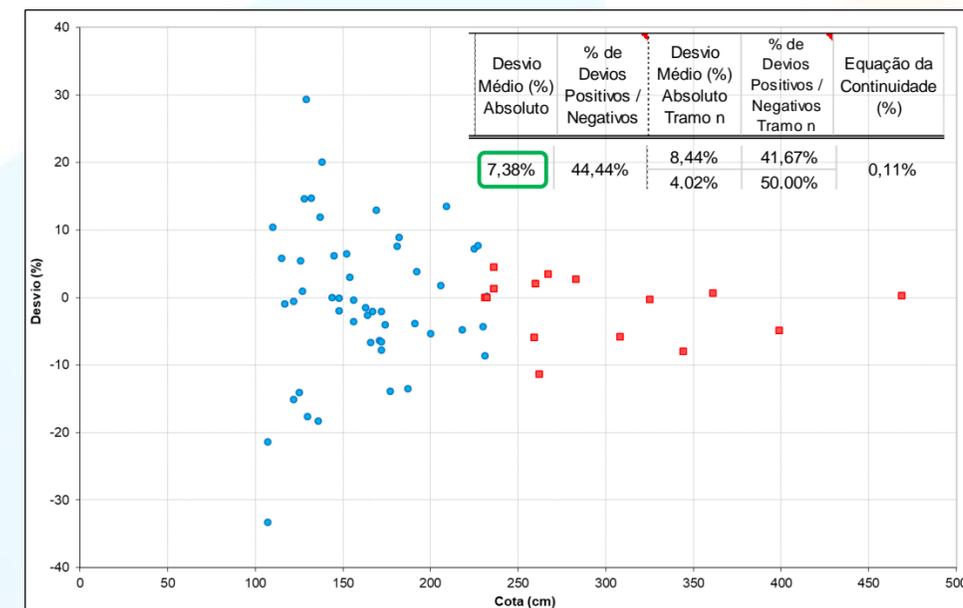
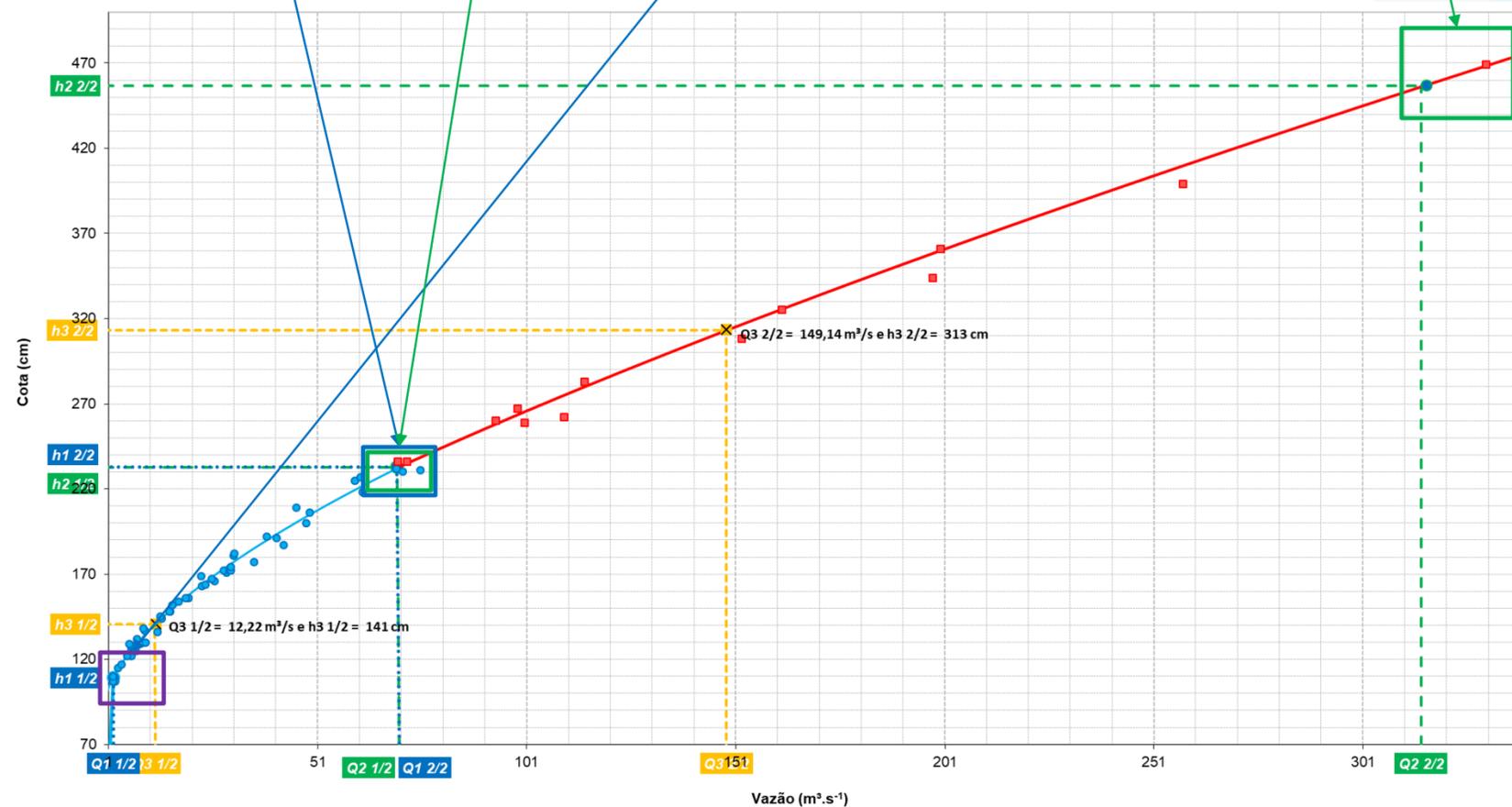
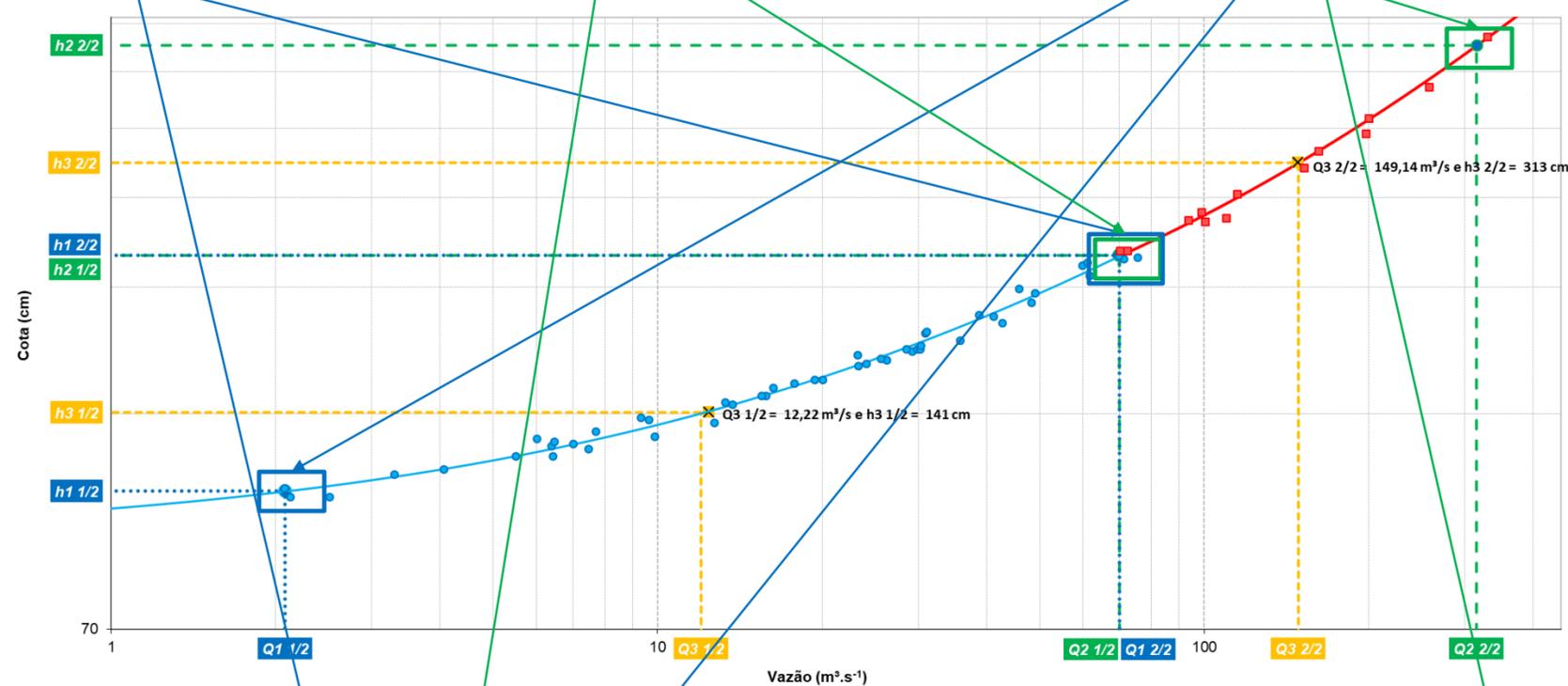
AG - Dois Tramos:

Ajuste otimizado com os valores de h_1 , Q_1 , h_2 e Q_2 fixos, conforme a relação com a medição de vazão na menor e maior cota da série histórica estudada.



AG - Dois Tramos:

Tramo 1: Ajuste otimizado com os valores de h_1 podendo variar de 1,00 a 1,15 cm, Q_1 podendo variar de 1,90 a 2,40 $m^3.s^{-1}$, h_2 podendo variar de 2,25 a 2,35 cm e Q_2 podendo variar de 68 a 72 $m^3.s^{-1}$. Tramo 2: Ajuste otimizado com os valores de h_1 podendo variar de 2,25 a 2,35 cm, Q_1 podendo variar de 68 a 72 $m^3.s^{-1}$, h_2 podendo variar de 4,50 a 4,90 cm e Q_2 podendo variar de 320 a 340 $m^3.s^{-1}$.



Análise dos resultados do traçado pelo algoritmo de Johnson e da otimização matemática dos diferentes tramos da curva-chave, com os intervalos de cotas e vazões, e os termos da equação potencial da curva-chave.

	a	h_0 (m)	n	h_1 (m)	Q_1 ($m^3 \cdot s^{-1}$)	h_2 (m)	Q_2 ($m^3 \cdot s^{-1}$)	h_3 (m)	Q_3 ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Desvio Médio (%) Absoluto	% de Devios Positivos / Negativos	Desvio Médio (%) Absoluto Tramo n	% de Devios Positivos / Negativos Tramo n	Equação da Continuidade (%)
Um Tramo														
Johnson - Único Tramo	1,6877	0,00	3,415	1,07	2,13	4,69	330,50	2,24	26,51	50,63%	3,17%			
PMNL ¹	Erro na função objetivo, bloqueada em um mínimo local.													
AG ¹	37,8936	0,90	1,626	1,07	2,13	4,69	330,50	1,70	26,51	8,77%	38,10%			
PMNL ²	Erro na função objetivo, bloqueada em um mínimo local.													
AG ²	41,0115	0,93	1,633	1,09	2,12	4,61	345,19	1,70	27,04	7,45%	46,03%			
Dois Tramos														
Johnson - Tramo 1	1,9482	0,05	4,417	1,07	2,13	2,30	70,00	1,57	12,20	23,16%	11,11%	28,10%	6,25%	0,03%
Johnson - Tramo 2	7,6577	-0,26	2,354	2,30	70,00	4,69	330,50	3,30	152,10					
PMNL ³ - Tramo 1	Erro na função objetivo, bloqueada em um mínimo local.													
PMNL ³ - Tramo 2	Erro na função objetivo, bloqueada em um mínimo local.													
AG ³ - Tramo 1	35,1654	0,85	1,853	1,07	2,13	2,30	70,00	1,42	12,2	7,67%	47,62%	8,70%	43,75%	0,01%
AG ³ - Tramo 2	63,1894	1,22	1,330	2,30	70,00	4,69	330,50	3,16	152,1					
PMNL ⁴ - Tramo 1	Erro na função objetivo, bloqueada em um mínimo local.													
PMNL ⁵ - Tramo 2	Erro na função objetivo, bloqueada em um mínimo local.													
AG ⁴ - Tramo 1	40,9419	0,93	1,626	1,09	2,12	2,33	70,44	1,41	12,22	7,38%	44,44%	8,44%	41,67%	0,11%
AG ⁵ - Tramo 2	67,1760	1,29	1,304	2,33	70,44	4,57	315,73	3,13	149,14					

¹ Tramo único: Ajuste otimizado com os valores de h_1 , h_2 , Q_1 e Q_2 fixos, conforme a relação com a medição de vazão na menor e maior cota da série histórica estudada.

² Tramo único: Ajuste otimizado com os valores de h_1 podendo variar de 1,00 a 1,15 cm, h_2 podendo variar de 4,50 a 4,90 cm, Q_1 podendo variar de 1,90 a 2,40 $m^3 \cdot s^{-1}$ e Q_2 podendo variar de 320 a 240 $m^3 \cdot s^{-1}$.

³ Dois Tramos: Ajuste otimizado com os valores de h_1 , h_2 , Q_1 e Q_2 fixos, para cada um dos dois tramos, conforme a relação com a medição de vazão na menor e maior cota da série histórica estudada, além da cota intermediária de 2,30 m e a vazão de 70 $m^3 \cdot s^{-1}$ entre os tramos 1 e 2.

⁴ Dois Tramos - Tramo 1: Ajuste otimizado com os valores de h_1 podendo variar de 1,00 a 1,15 cm, h_2 podendo variar de 2,25 a 2,35 cm, Q_1 podendo variar de 1,90 a 2,40 $m^3 \cdot s^{-1}$ e Q_2 podendo variar de 68 a 72 $m^3 \cdot s^{-1}$.

⁵ Dois Tramos - Tramo 2: Ajuste otimizado com os valores de h_1 podendo variar de 2,25 a 2,35 cm, h_2 podendo variar de 4,50 a 4,90 cm, Q_1 podendo variar de 68 a 72 $m^3 \cdot s^{-1}$ e Q_2 podendo variar de 320 a 340 $m^3 \cdot s^{-1}$.

Conclusão

Conclui-se que, na concepção de curva-chave, tanto no traçado inicial pelo algoritmo de Johnson, como no seu ajuste por otimização matemática, o conhecimento do comportamento dos termos da equação da curva-chave, sejam as variáveis ou os coeficientes, além da determinação do hidrologista de quantos tramos e de como proceder o melhor ajuste, visando o menor desvio médio entre vazão medida e vazão calculada, é de primordial importância para se obter melhores resultados.

Conclui-se, para as especificidades deste estudo, que a utilização de dois tramos foi melhor que um único tramo na curva-chave e, que, o seu ajuste por otimização matemática utilizando AG obtém-se melhores resultados em relação ao desvio médio entre as MDL e as calculadas.

Conheçam o material de hidrologia disponível no site do SGB / CPRM:

Resultado da pesquisa

Buscar em: PRODUÇÃO CIENTÍFICA

por: [] Ir

Filtros correntes: Autor | Igual

MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha

Título | Contém | curva-chave

Retornar valores

Adicionar filtros:

Utilizar filtros para refinar o resultado de busca.

Título | Igual | Adicionar

Resultados/Página 10 | Ordenar registros por Relevância | Ordenar Descendente

Registro(s) Todos | Atualizar

Resultado 1-10 de 11.

Anterior 1 2 Próximo

Data	Título	Autor(es)
2015	Curva-chave traçada pelo MATLAB com diferentes tipos de equações suportadas pelo programa HIDRO	MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha
2015	Algoritmos genéticos e programação matemática não linear na otimização de curva-chave	MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha
2016	Traçado de curva-chave unívoca utilizando a regressão simples e robusta do MATLAB	MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha
Dez-2017	Curva-chave com três tramos consecutivos ajustada com uma única função objetivo não linear	MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha
2021	Estimativa da produção de sedimentos utilizando a curva-chave de sedimentos	MENEZES, Danlei de; MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha

SACE SISTEMA DE ALERTA DE EVENTOS CRÍTICOS - SACE

SGB - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM

Página Inicial | **Bacias Monitoradas** | Manchas de Inundação | Secas e Estiagens | Monitoramento Especial

BACIAS MONITORADAS

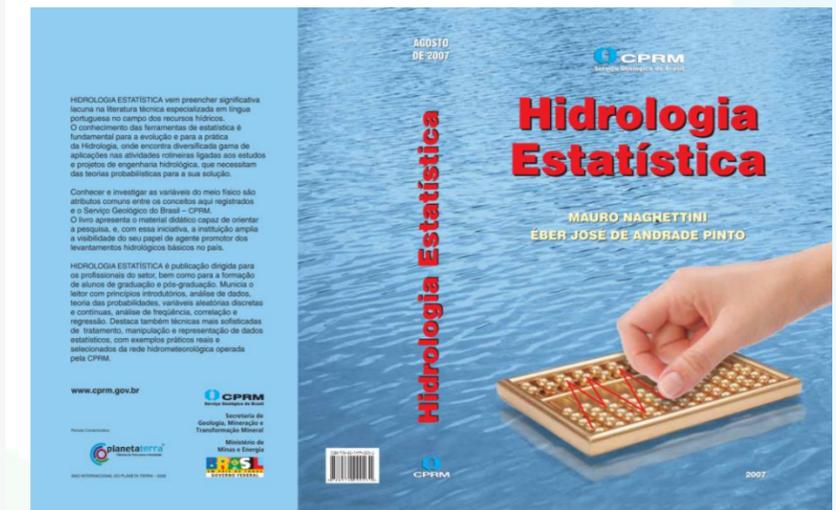
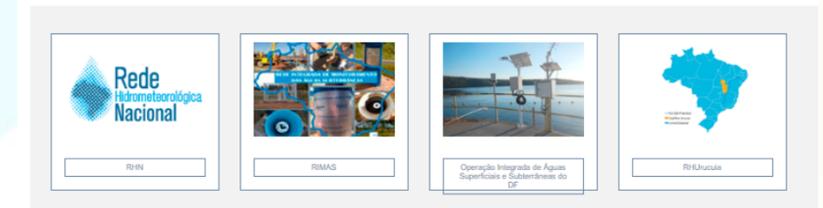
Sistemas de Alertas Hidrológicos atualmente em operação:

1. Bacia do rio Amazonas: em operação desde 1989
2. Bacia do rio Paraguai (Pantanal): em operação desde 1994
3. Bacia do rio Doce: em operação desde 1996
4. Bacia do rio Caí: em operação desde 2010
5. Bacia do rio Muriaé: em operação desde 2014
6. Bacia do rio Acre: em operação desde 2014
7. Bacia do rio Madeira: em operação desde 2014
8. Bacia do rio Parnaíba: em operação desde 2015
9. Bacia do rio Taquari: em operação desde 2015
10. Bacia do rio Branco: em operação desde 2015
11. Bacia do rio Xingu: operação a partir de janeiro de 2017
12. Bacia do rio Mundaú: em operação desde dezembro de 2017
13. Bacia do rio Uruguai: em operação desde dezembro de 2018
14. Bacia do rio das Velhas: em operação desde dezembro de 2018
15. Bacia do rio Itapecuru: em operação desde dezembro de 2019
16. Bacia do rio Pomba: em operação desde dezembro de 2019
17. Bacia do rio São Francisco: em implantação (2021)

Monitoramento Hidrológico e Hidrogeológico

Na linha de levantamentos hidrogeológicos, desde o início da década de 2010 o Serviço Geológico do Brasil - SGB/CPRM implementa e mantém a Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas - RIMAS. Com mais de 400 poços dedicados, a RIMAS realiza o monitoramento quali-quantitativo nos principais aquíferos livres do Brasil, como: Guarani, Alter do Chão e Urucua. Onde a RHN não possui cobertura, a RIMAS também instala e opera estações automáticas de coleta de dados hidrometeorológicas, os quais são utilizados na estimativa de recarga dos aquíferos.

Na linha de levantamentos hidrometeorológicos, o SGB participa do planejamento e executa serviços de hidrologia para a União desde a década de 1970, bem como opera a Rede Hidrometeorológica Nacional - RHN, atualmente gerenciada pela Agência Nacional de Águas - ANA. Desde 2014, participa da implantação da Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência - RHNR, através de uma parceria firmada entre o Serviço Geológico dos Estados Unidos - USGS, a ANA e o SGB, que prevê a otimização e a modernização da RHN.



Todo material produzido ou utilizado direta e/ou indiretamente como apoio, neste estudo, está no artigo, para baixar da internet:

Curvas-Chave RIGEO



Mapas Bacia Uruguai PDF



Mapas Estado RS PDF



Sub-Bacias do Brasil



Regionalização de Vazões



Repositório do SGB / CPRM



SGB-CPRM

Obrigado Pela Atenção!

francisco.marcuzzo@sgb.gov.br



SECRETARIA DE
GEOLOGIA, MINERAÇÃO
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

GOVERNO
FEDERAL