



Escola Politécnica

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

Universidade de São Paulo

**PHA3307 –
Hidrologia Aplicada**

Regularização de Vazões

Aula 16

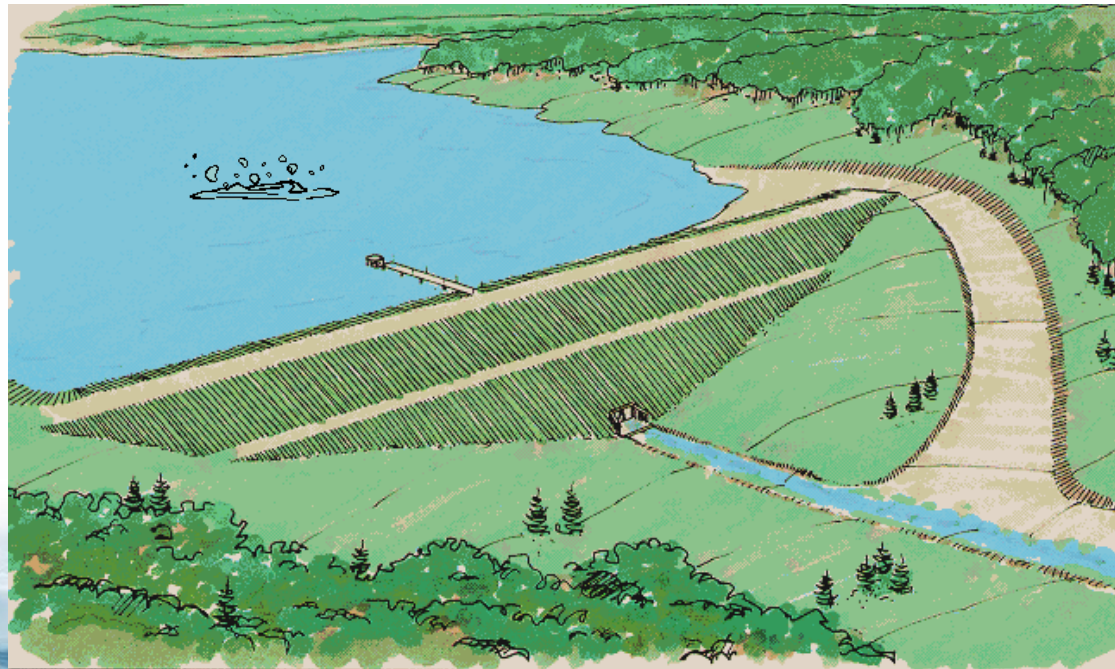
**Prof. Dr. Arisvaldo Mélo
Prof. Dr. Joaquin B. Garcia**

LabSid

Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões
Recursos Hídricos e Meio Ambiente

1. Aprender os conceitos de regularização de vazões.
2. Conhecer os níveis operacionais de um reservatório.
3. Conhecer o conceito de volume útil.
4. Aprender a dimensionar o volume útil de um reservatório com o método do reservatório semi-infinito.

- O que é
- Importância
- Cálculo do volume necessário (Volume Útil) para regularizar uma determinada vazão (Q_{reg})
 - Dados necessários
 - Hipóteses
 - Uso de uma ferramenta para cálculo e análise



Propósitos de uma Regularização de Vazões

Controle de Inundações



Abastecimento



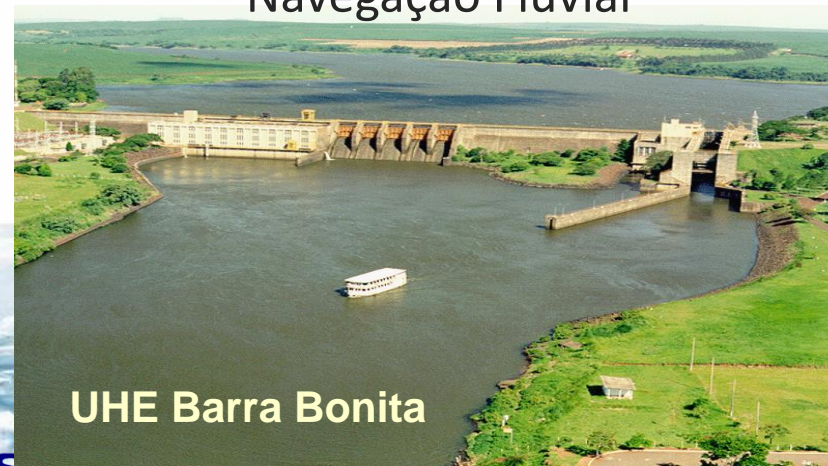
Recreação e Paisagismo



Geração de Energia



Navegação Fluvial

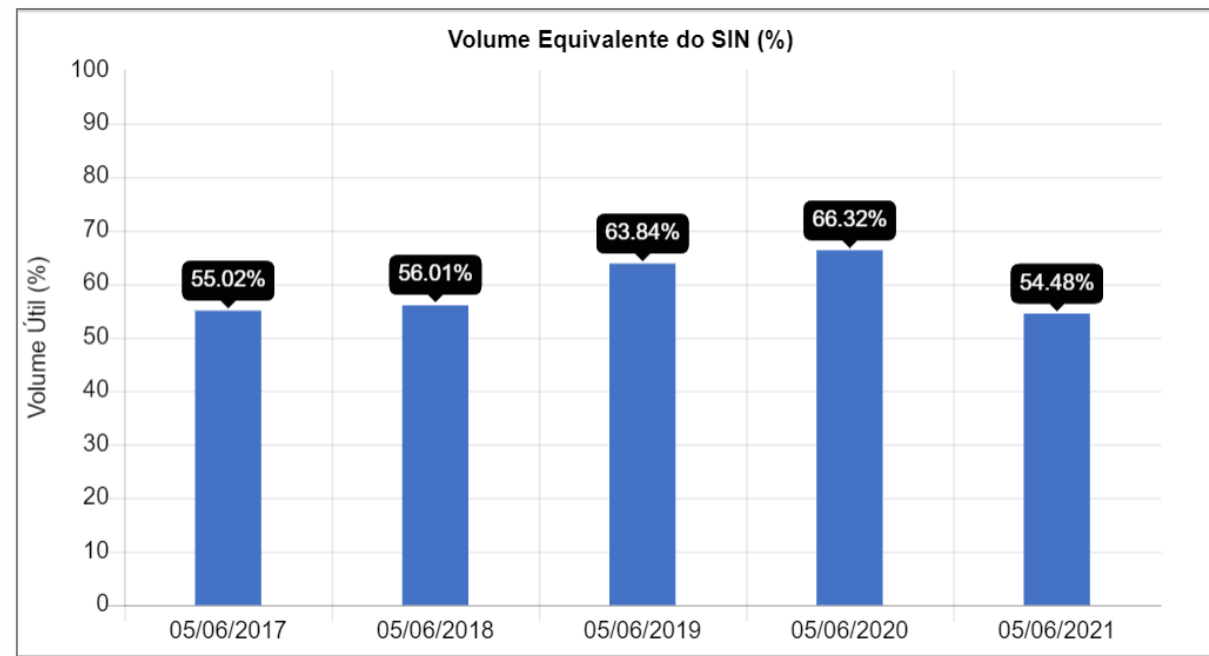


UHE Barra Bonita

Sistema Interligado Nacional

Geração de Energia

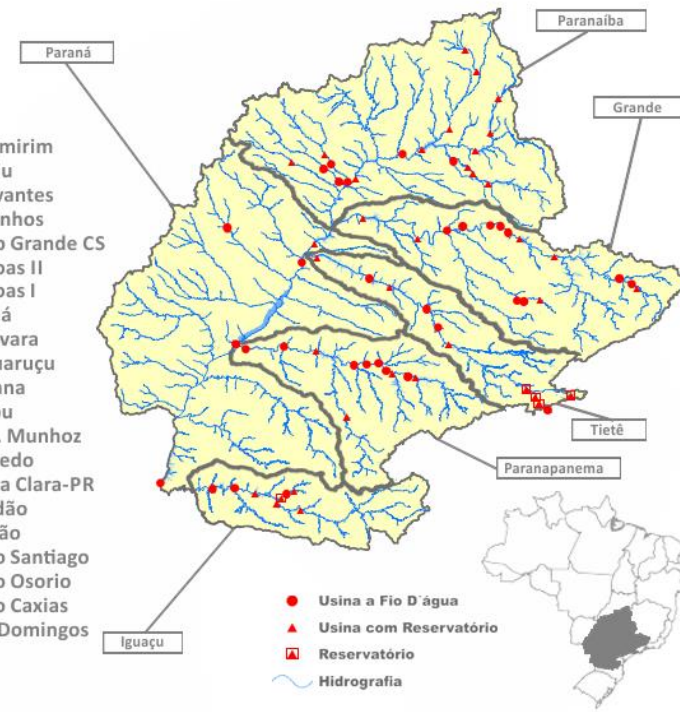
Tipo de Aproveitamento	No
Reservatório	10
Usina a Fio d'Água	91
Usina com Reservatório	60
Usina de Bombeamento	1



Bacia do Rio Paraná

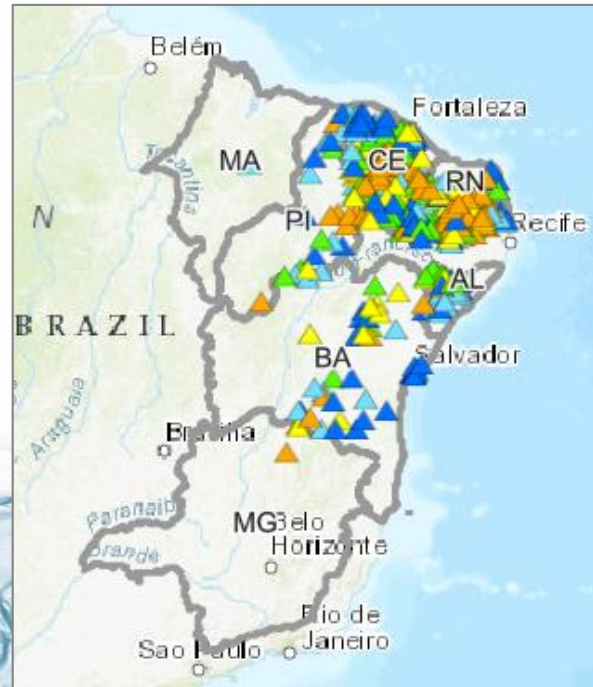
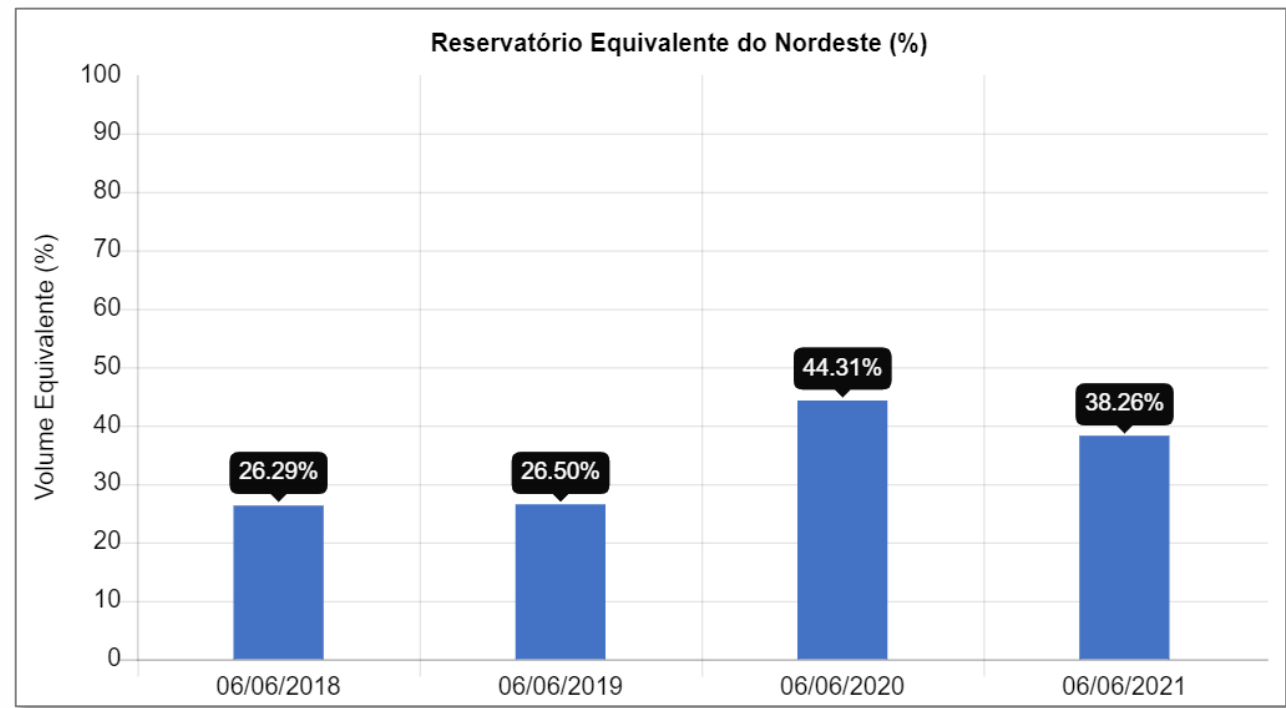
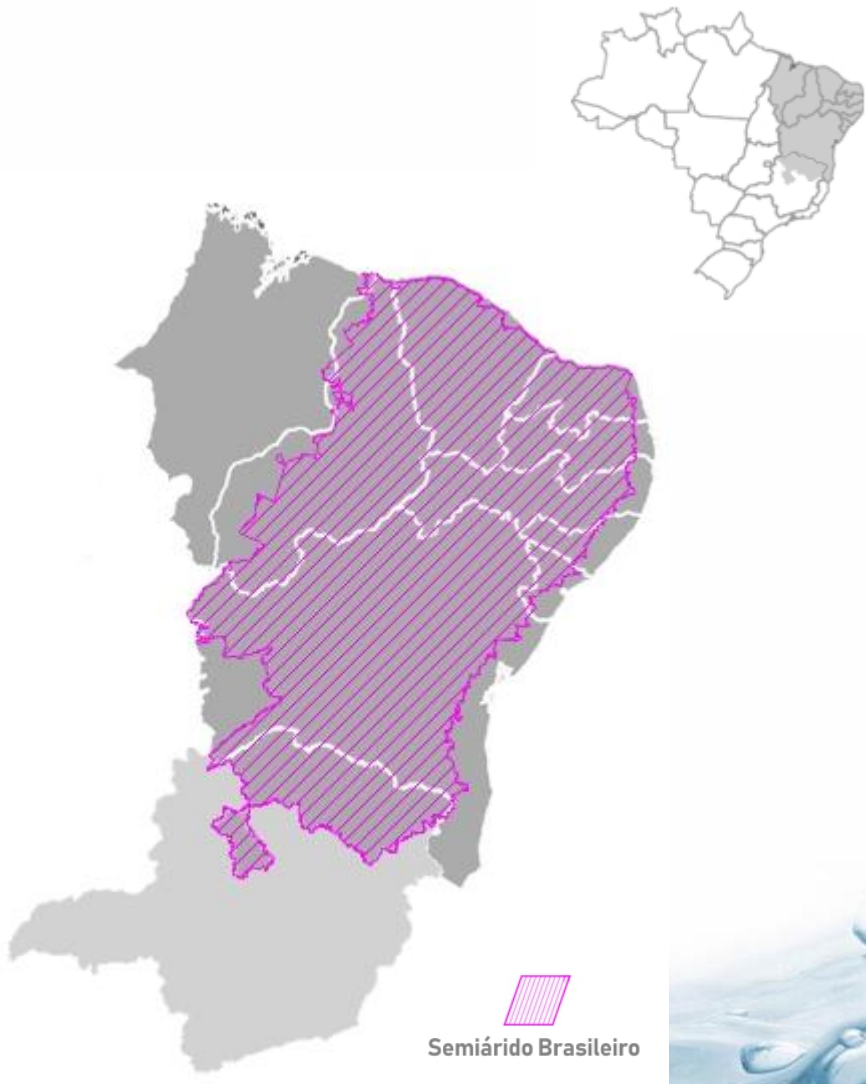
Reservatórios

- Camargos
- Itutinga
- Funil-MG
- Furnas
- M. Moraes
- L. C. Barreto
- Jaguará
- Igarapava
- Volta Grande
- P. Colômbia
- Caconde
- E. da Cunha
- Limoeiro
- Maribomdo
- A. Vermelha
- Batalha
- S. do Facão
- Emborcação
- Nova Ponte
- Miranda
- C. Branco-1
- C. Branco-2
- Corumbá-4
- Corumbá-3
- Corumbá
- Itumbiara
- C. Dourada
- São Simão
- Cacú
- B. Coqueiros
- Foz R. Claro
- Salto
- S. R. Verdinho
- Espora
- I. Solteira
- Henry Borden
- Billings
- Guarapiranga
- Ponte Nova
- Edgard Souza
- B. Bonita
- Bariri
- Ibitinga
- Promissão
- N. Avandava
- Três Irmãos
- Jupia
- Porto Primavera
- Jurumirim
- Piraju
- Chavantes
- Ourinhos
- Salto Grande CS
- Canoas II
- Canoas I
- Mauá
- Capivara
- Taquaruçu
- Rosana
- Itaípu
- G. B. Munhoz
- Segredo
- Santa Clara-PR
- Fundão
- Jordão
- Salto Santiago
- Salto Osório
- Salto Caxias
- São Domingos



Sistema Interligado Nacional

Geração de Energia

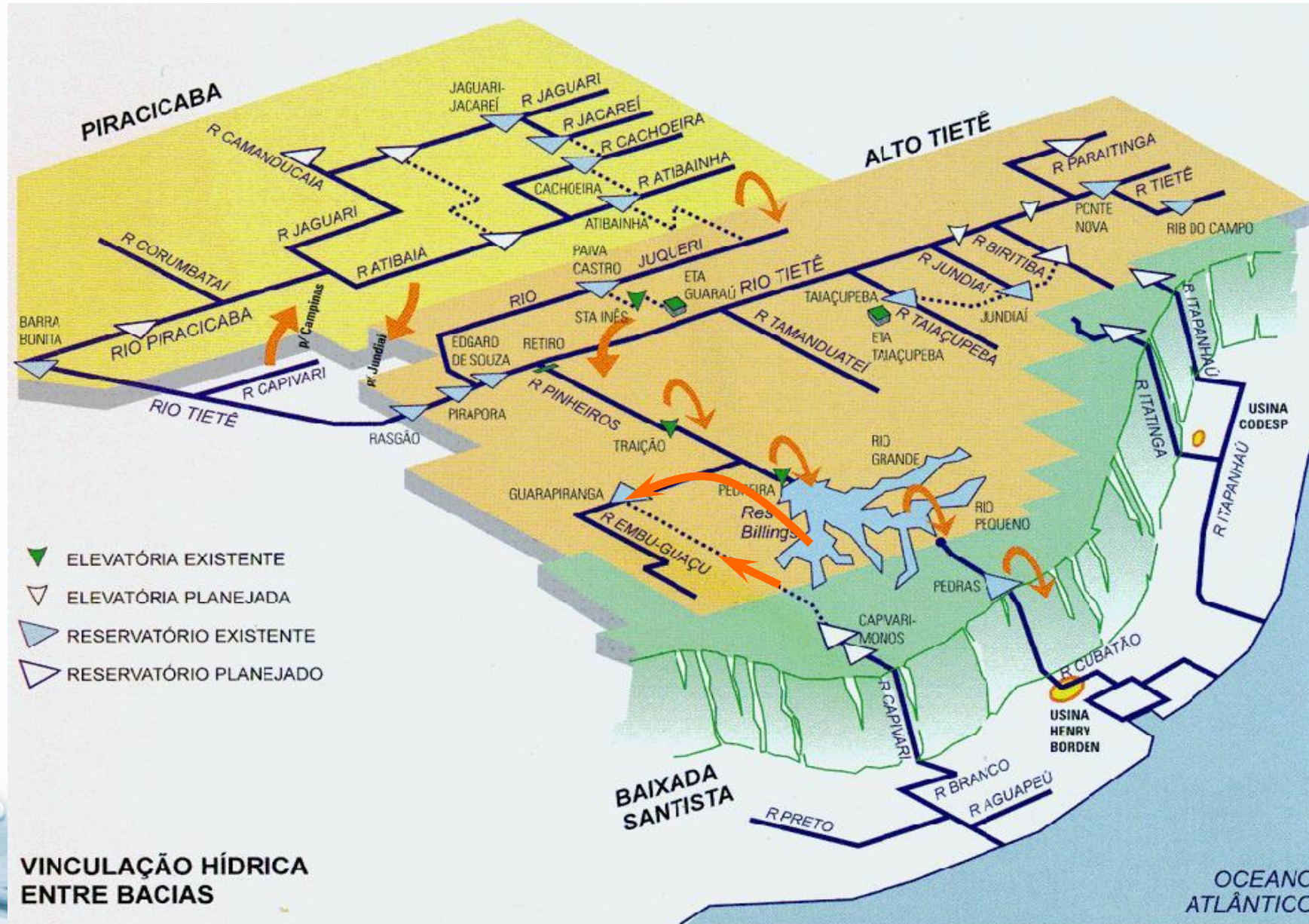


% Armazenado	Nº Reservatórios
▲ Acima de 80%	98
▲ Entre 60% e 80%	83
▲ Entre 40% e 60%	77
▲ Entre 20% e 40%	65
▲ Abaixo de 20%	114

Fonte: ANA, 2020

<https://www.ana.gov.br/sar/>

Barragens do Alto Tietê e Piracicaba (parcial)

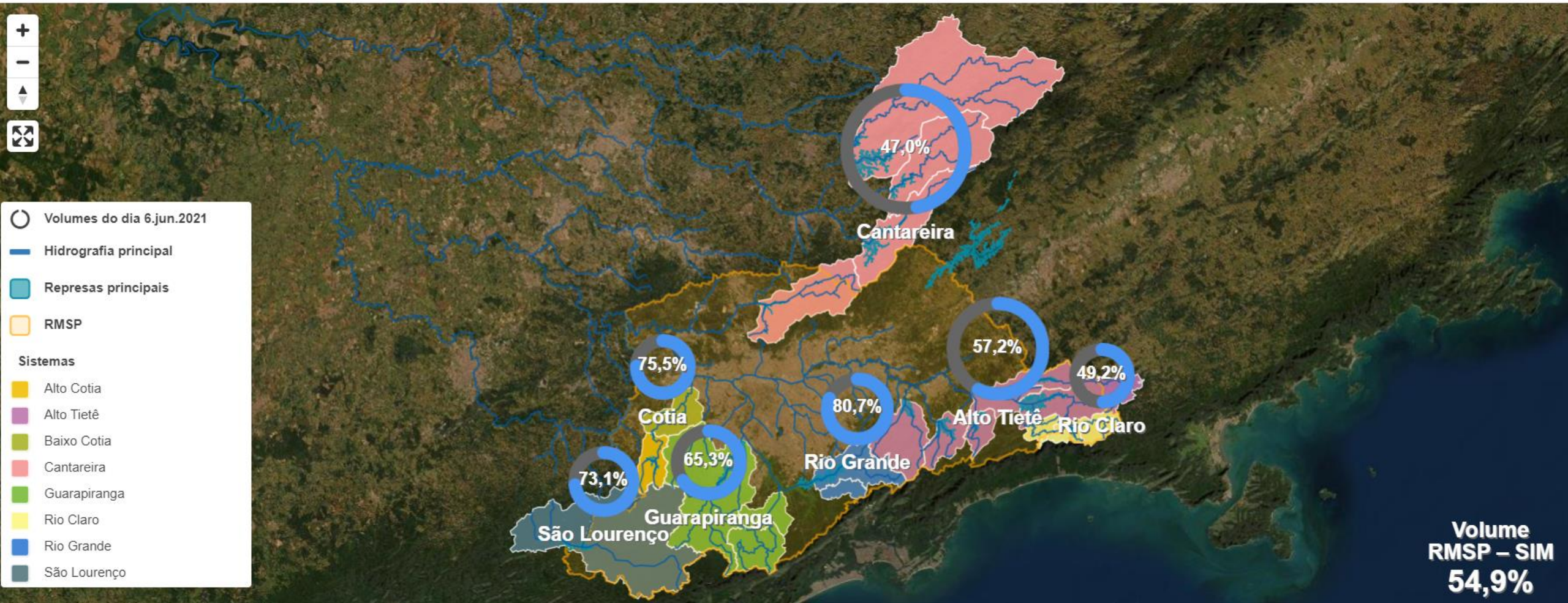


VINCULAÇÃO HÍDRICA ENTRE BACIAS

Dados de: 06/06/2021

HidroMapas

Volume dos Sistemas

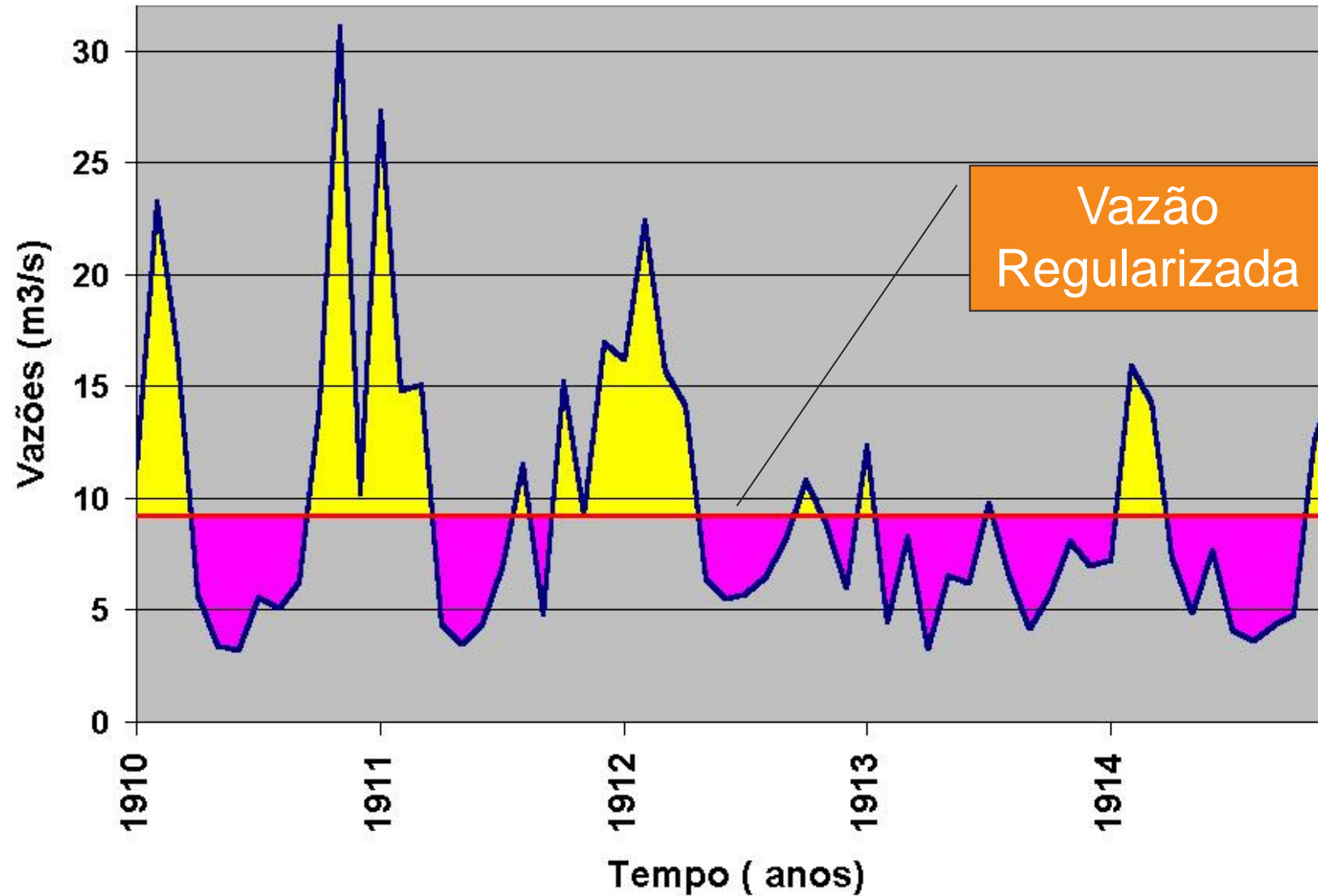


Domingo, 06 de Junho de 2021
Gerado às 08:26 hs de 06/06/2021

Condições de Armazenamento dos Mananciais que Abastecem a RMSP.

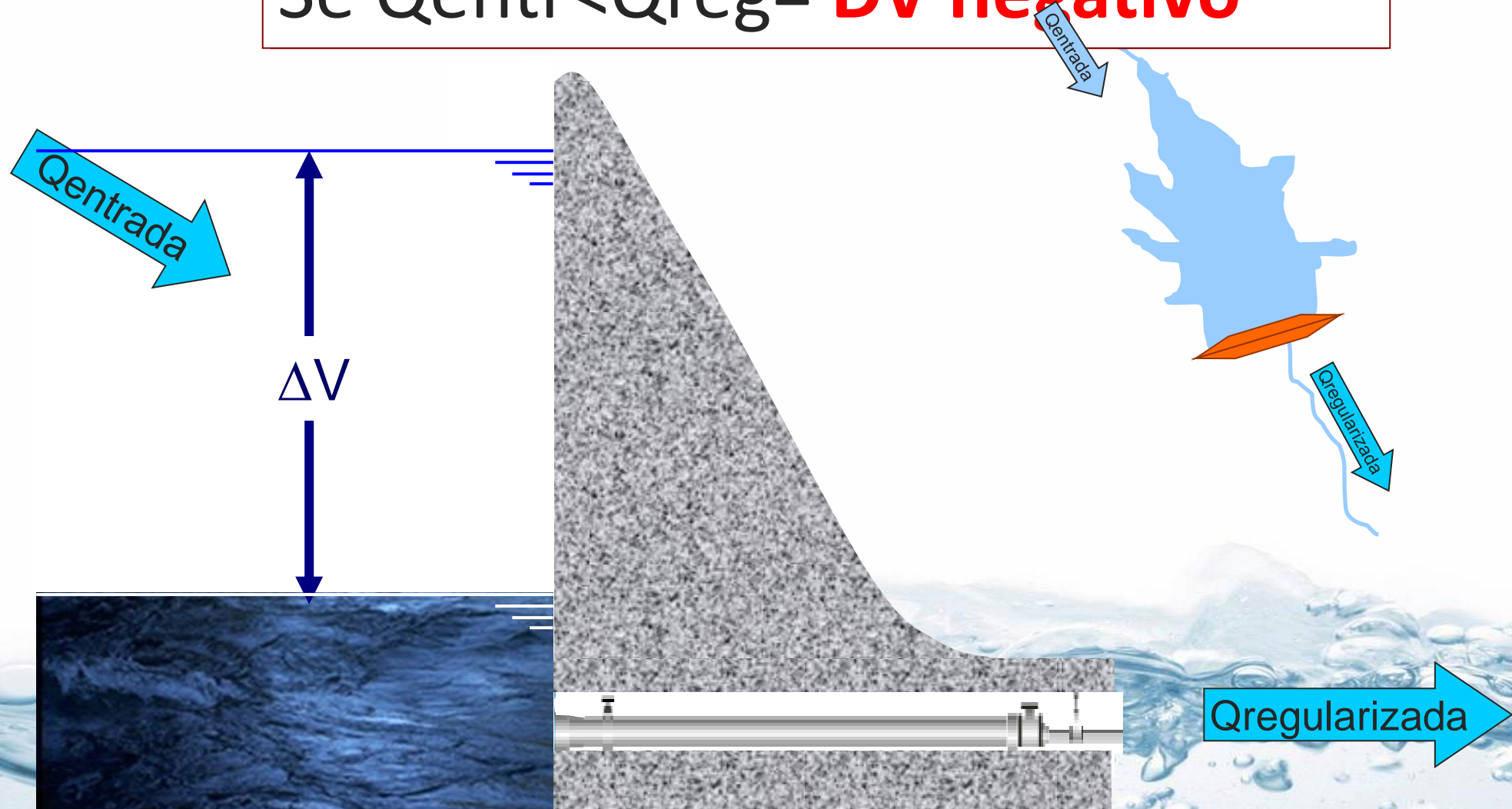
Sistema	Nível às 7h (m)	Volume Operacional				Vazão						Vazão Captada ETA		Qcaptada + Qdescarga diária (m³/s)
		às 7h (x10 ⁶ m³)	índice (%)	var. dia (%)	máximo (x10 ⁶ m³)	Qafluente diária (m³/s)	Qnatural diária (m³/s)	Qdescarregada diária (m³/s)	Qnatural média mês (m³/s)	Qn MLT med hist mensal (m³/s)	Qn/Qn MLT mensal (%)	dia anterior (m³/s)	média mês (m³/s)	
Cantareira ▼		461,46	47,0	(0,1)	982,07	17,27	9,62	10,10	10,67	34,30	31,1	22,01	22,20	32,11
<i>Jaguari/Jacarei</i>	834,78	404,74	50,1		808,04	4,78	4,78	1,50				T-7	12,00	
<i>Cachoeira</i>	815,61	22,29	32,0		69,65	13,10	1,10	4,00				T-6	12,78	
<i>Atibainha</i>	783,55	31,12	32,3		96,25	22,36	1,92	4,50				T-5	20,09	
<i>Paiva Castro</i>	744,52	2,87	37,7		7,61	21,91	1,82	0,10				EEAB PS-SC	7,66	
Guarapiranga ▼	734,33	111,85	65,3	(0,3)	171,19	8,38	5,73	0,00	6,86	9,22	74,4	14,10	13,90	14,10
<i>Taquacetuba</i>	744,88											EEAB-T	2,07	
<i>Capivari</i>	740,59											EEAB-C	0,58	
Rio Grande ▼	745,99	90,52	80,7	(0,4)	112,18	1,30	1,30	0,00	1,88	3,54	53,0	4,81	4,74	7,13
												EEAB-P	0,00	
Rio Claro ▼		6,72	49,2	(0,2)	13,67	3,64	3,15	0,83	3,59	5,03	71,3	3,21	3,19	4,04
<i>Rib. do Campo</i>	870,51	6,72	49,2		13,67	0,26	0,26	0,67				EEAB-G	0,49	
Alto Tietê ▼		320,55	57,2	(0,2)	560,31	7,06	3,91	11,05	6,15	15,16	40,6	14,16	14,05	25,21
<i>Ponte Nova</i>	766,01	230,75	70,1		329,37	1,29	0,46	9,25				EEAB-B	8,80	
<i>Paraitinga</i>	762,48	12,19	33,1		36,88	0,60	0,60	1,25				B-DB	1,50	
<i>Biritiba</i>	754,47	11,17	32,1		34,76	0,91	0,91	0,15				DB-J	10,30	
<i>Jundiá</i>	750,24	17,94	24,2		74,09	10,41	0,11	0,10				J-T	7,80	
<i>Taiçupeba</i>	744,73	48,49	56,9		85,20	11,44	1,32	0,30				EEAB-RGG	2,32	
Alto Cotia ▼		12,45	75,5	(0,2)	16,50	0,48	0,48	0,07	0,59	1,39	42,7	0,77	0,77	0,84
<i>Pedro Beicht</i>	917,33	12,45	75,5					0,69						
<i>Graça</i>	868,38							0,07						
Baixo Cotia								2,46				0,00	0,00	2,46
São Lourenço ▼		64,95	73,1	(0,3)	88,82	14,14	14,14	11,64	16,05	21,90	73,29	4,79	4,77	16,42
<i>Cachoeira do França</i>	637,74	64,95	73,1											
Rib. Estiva												0,07	0,07	
Cantareira Velho ▼		0,51	51,6	(1,0)	0,99	0,36	0,36	0,06				0,31	0,30	0,37
<i>Cabuçu</i>	762,00	0,48	51,5		0,93	0,28	0,28	0,05				0,24	0,24	
<i>Tanque Grande</i>	824,08	0,03	51,0		0,06	0,08	0,08	0,01				0,07	0,06	
TOTAL ▼		1.069,02	54,9	(0,2)	1.945,7	52,63	38,68	36,20	45,79	90,54	50,58	64,23	63,99	102,68

Sistema Cantareira: A partir de 01/02/2021 o Sistema opera na Faixa 2, com retirada média mensal máxima de 31 m³/s.



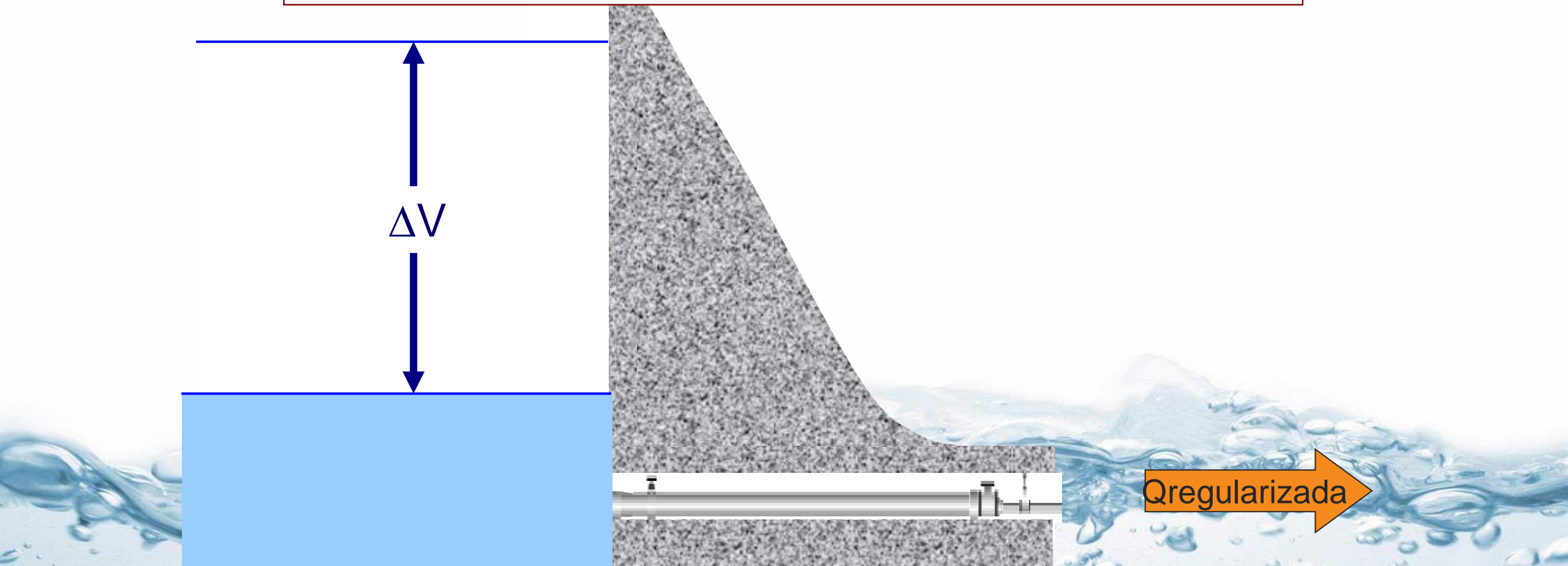
$$(Q_{\text{entr}} - Q_{\text{reg}}) \Delta t = \Delta V$$

Se $Q_{\text{entr}} < Q_{\text{reg}} = \Delta V$ **negativo**



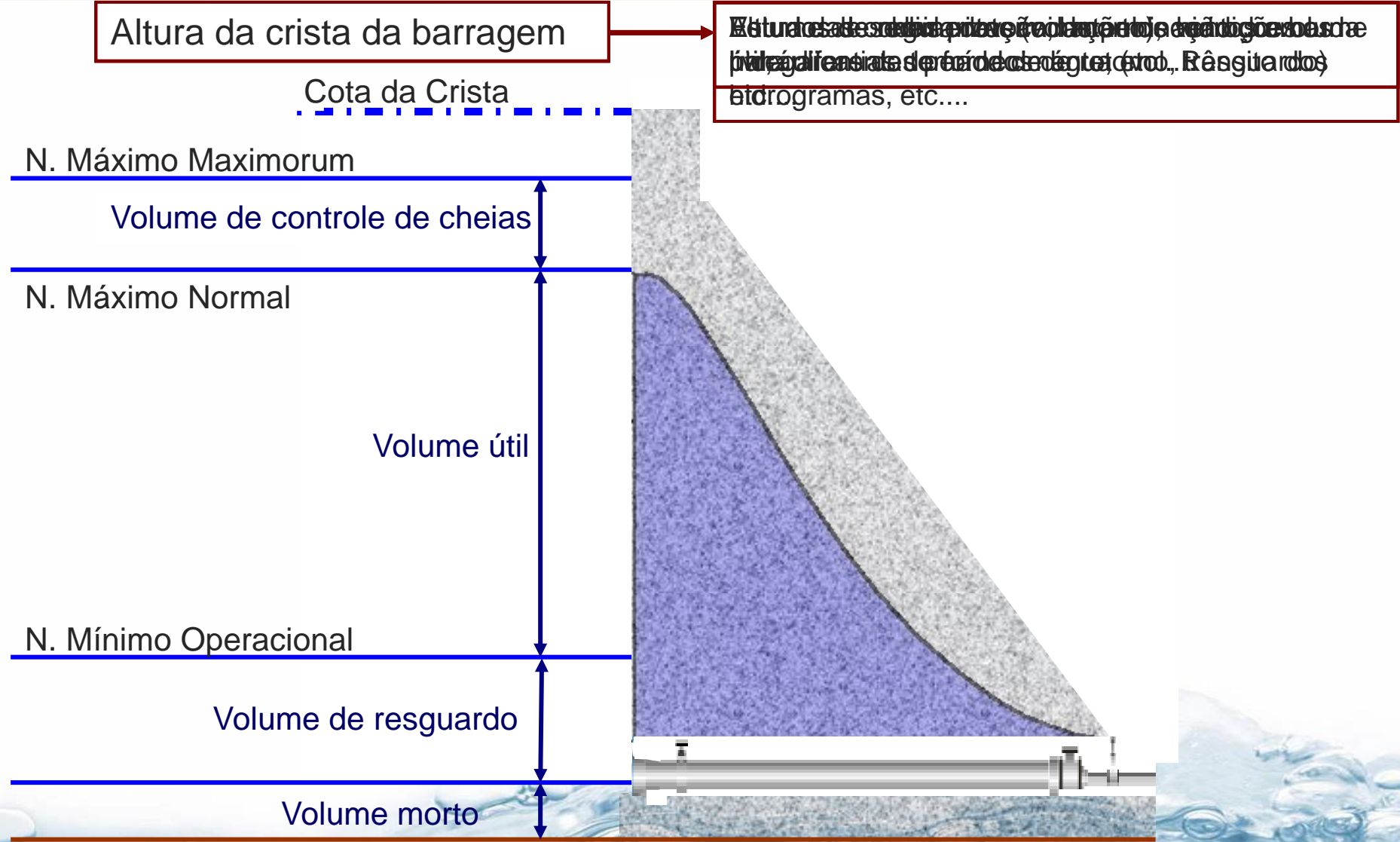
$$(Q_{entr} - Q_{reg}) Dt = \Delta V$$

Se V_u for muito grande, parte do reservatório fica ociosa e a obra fica superdimensionada



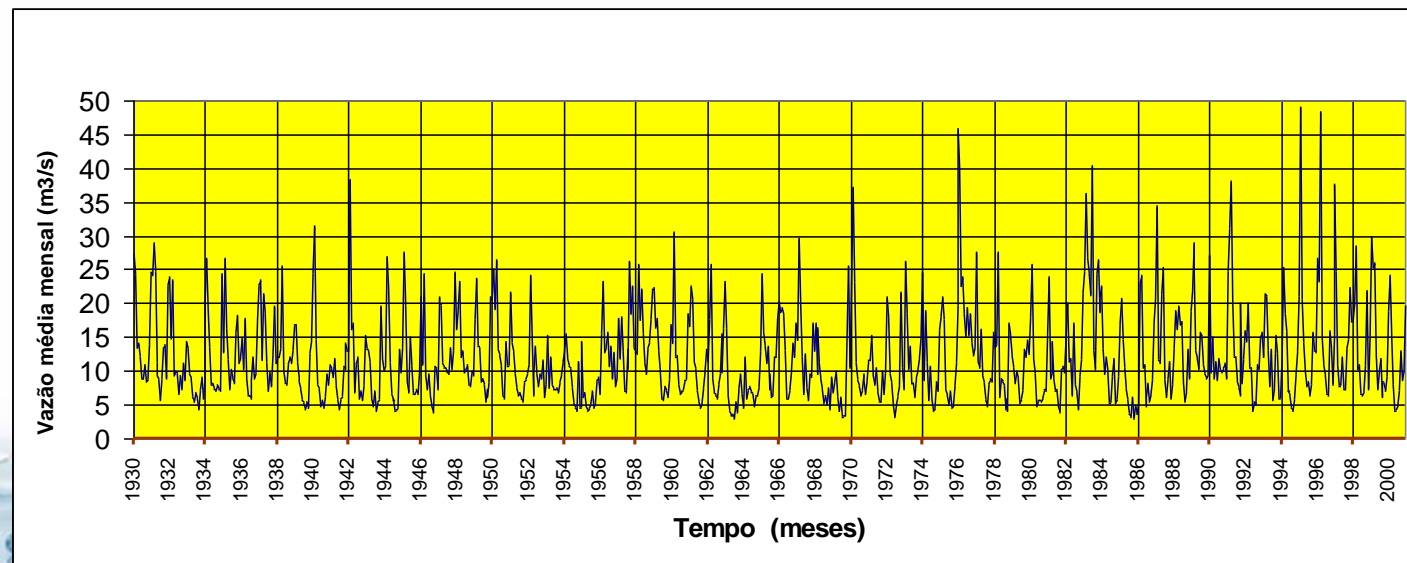
- O Vu está diretamente associado aos benefícios da obra
- O Vu influi nas dimensões da obra (custos)
- O Vu influi na área inundada (impactos ambientais e sociais)
- Nem sempre se pode contar com o Vu necessário (análise de riscos)

Definição da Altura de Barragens e Volumes Operacionais



Cálculo do Volume Útil

- Baseia-se na equação da continuidade:
- $(Q_e - Q_s) Dt = DV$
 - Q_e = vazão de entrada no reservatório
 - Q_s = vazão de saída do reservatório
 - DV = variação de volume do reservatório
 - Dt = intervalo de tempo dos cálculos
- A análise é feita ao longo de uma serie histórica de vazões médias mensais



- Δt mensal é suficientemente preciso para a maioria dos casos
- $\Delta t = (365 \times 24 \times 60 \times 60)/12 = 2.628.000$ s número médio de segundos em um mês
- A serie histórica é representativa do regime hidrológico do rio, ou seja, admite-se comportamento semelhante do rio durante a vida da obra
- No atual estágio da tecnologia é impossível fazer previsões a tão longo prazo
- Análises de risco, por exemplo: qual a probabilidade de conseguir garantir somente 90% da vazão desejada? Por quanto tempo?
- E as mudanças climáticas?

Técnica do Diagrama de Massas (Rippl -1883)

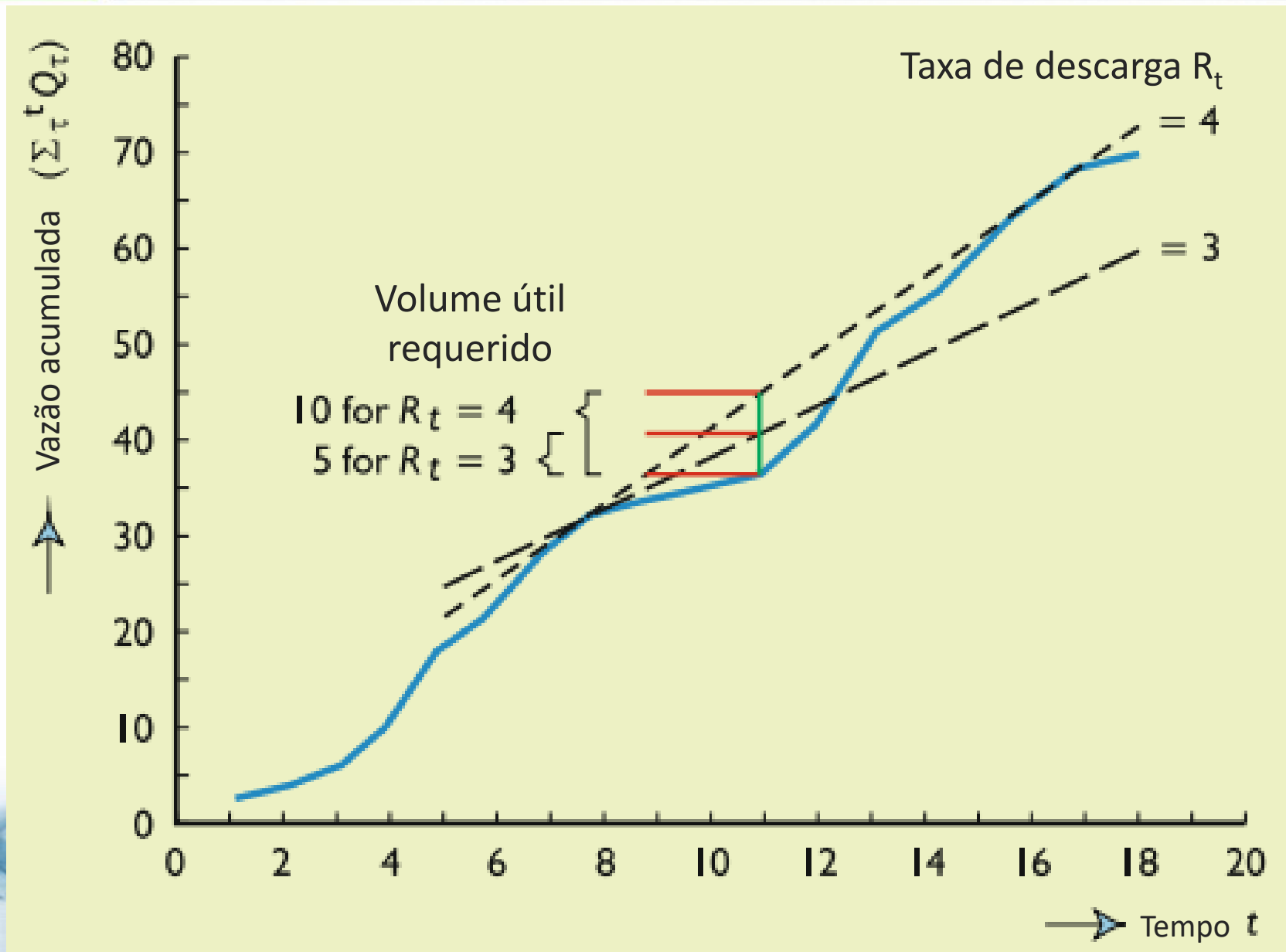
Técnicas de Simulação

Modelos de Otimização

Métodos Empíricos

Métodos Estatísticos

UHE ITAIPU

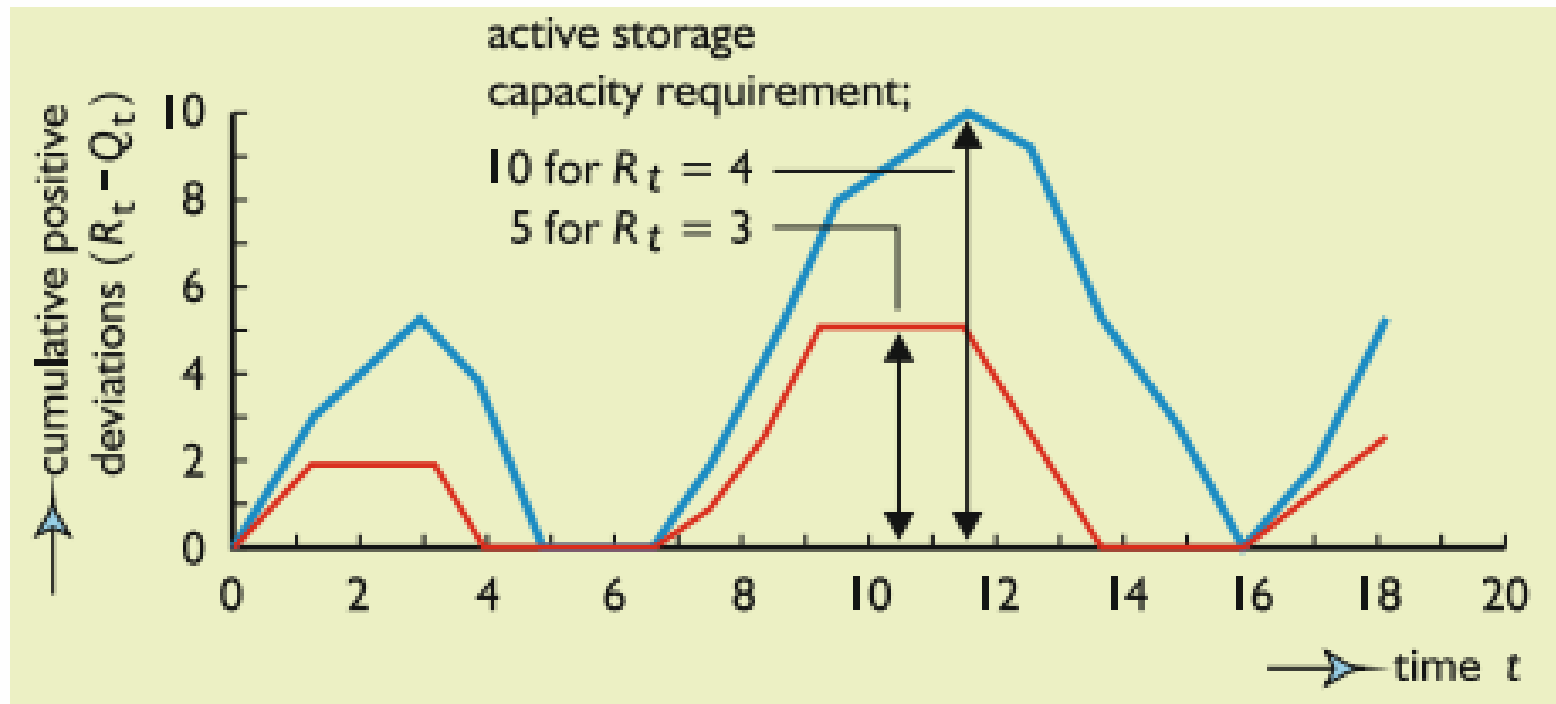


$$V_u = \text{máximo} \left[\sum_{t=1}^{2T} (R_t - Q_t) \right]$$

$2T$ – dois períodos de tempo



$$\sum_t^T (R_t - Q_t)$$



Desvios acumulados não negativos (picos sequenciais)

$$R_t - Q_t + V_{t-1} = V_t$$

$$V_t = R_t - Q_t + V_{t-1} \quad \text{se positivo}$$

$$V_t = 0 \quad \text{caso contrário}$$

Primeiro período

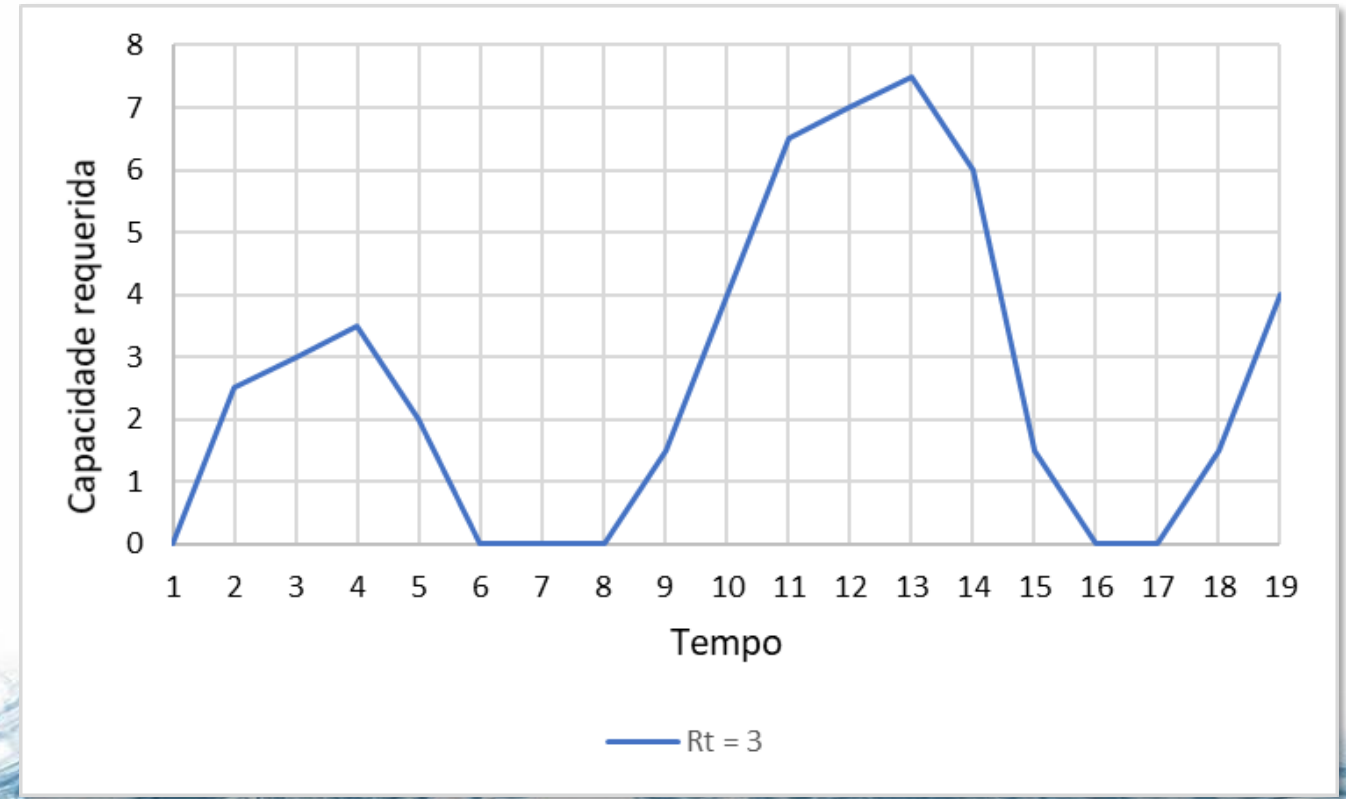
1	3.5 - 1.0 + 0.0 = 2.5
2	3.5 - 3.0 + 2.5 = 3.0
3	3.5 - 3.0 + 3.0 = 3.5
4	3.5 - 5.0 + 3.5 = 2.0
5	3.5 - 8.0 + 2.0 = 0.0
6	3.5 - 6.0 + 0.0 = 0.0
7	3.5 - 7.0 + 0.0 = 0.0
8	3.5 - 2.0 + 0.0 = 1.5
9	3.5 - 1.0 + 1.5 = 4.0

Segundo período

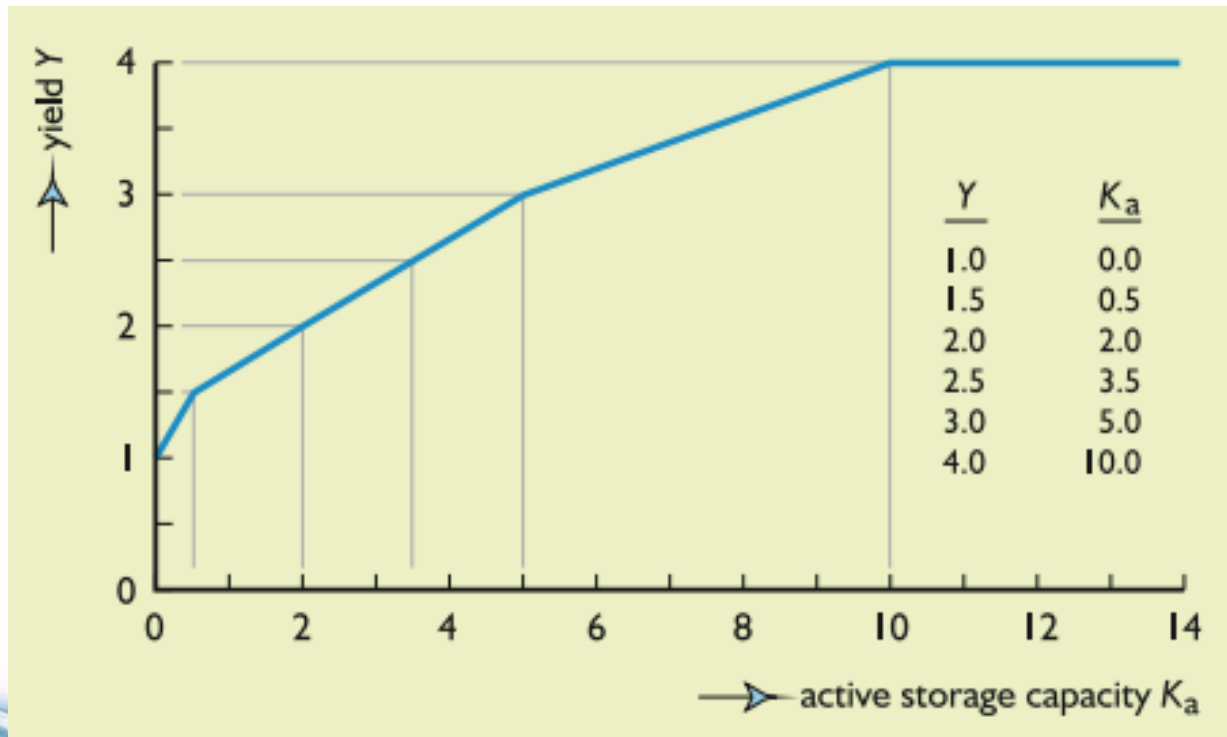
1	3.5 - 1.0 + 4.0 = 6.5
2	3.5 - 3.0 + 6.5 = 7.0
3	3.5 - 3.0 + 7.0 = 7.5
4	3.5 - 5.0 + 7.5 = 6.0
5	3.5 - 8.0 + 6.0 = 1.5
6	3.5 - 6.0 + 1.5 = 0.0
7	3.5 - 7.0 + 0.0 = 0.0
8	3.5 - 2.0 + 0.0 = 1.5
9	3.5 - 1.0 + 1.5 = 4.0

V_u

Início da repetição



- capacidade de armazenamento ativa mínima necessária para garantir uma dada taxa de retirada constante para uma sequência especificada de influxos do reservatório (Y)
- Capacidade de armazenamento requerida (K)



$$\min \sum_{t=1}^T [(V_t - K)^2 + (R_t - Y)^2]$$

$$V_t = V_{t-1} + R_t - Q_t$$

$$V_t \leq K$$

$$R_t \geq Y$$

$$0 \leq K \leq \text{limite superior}$$

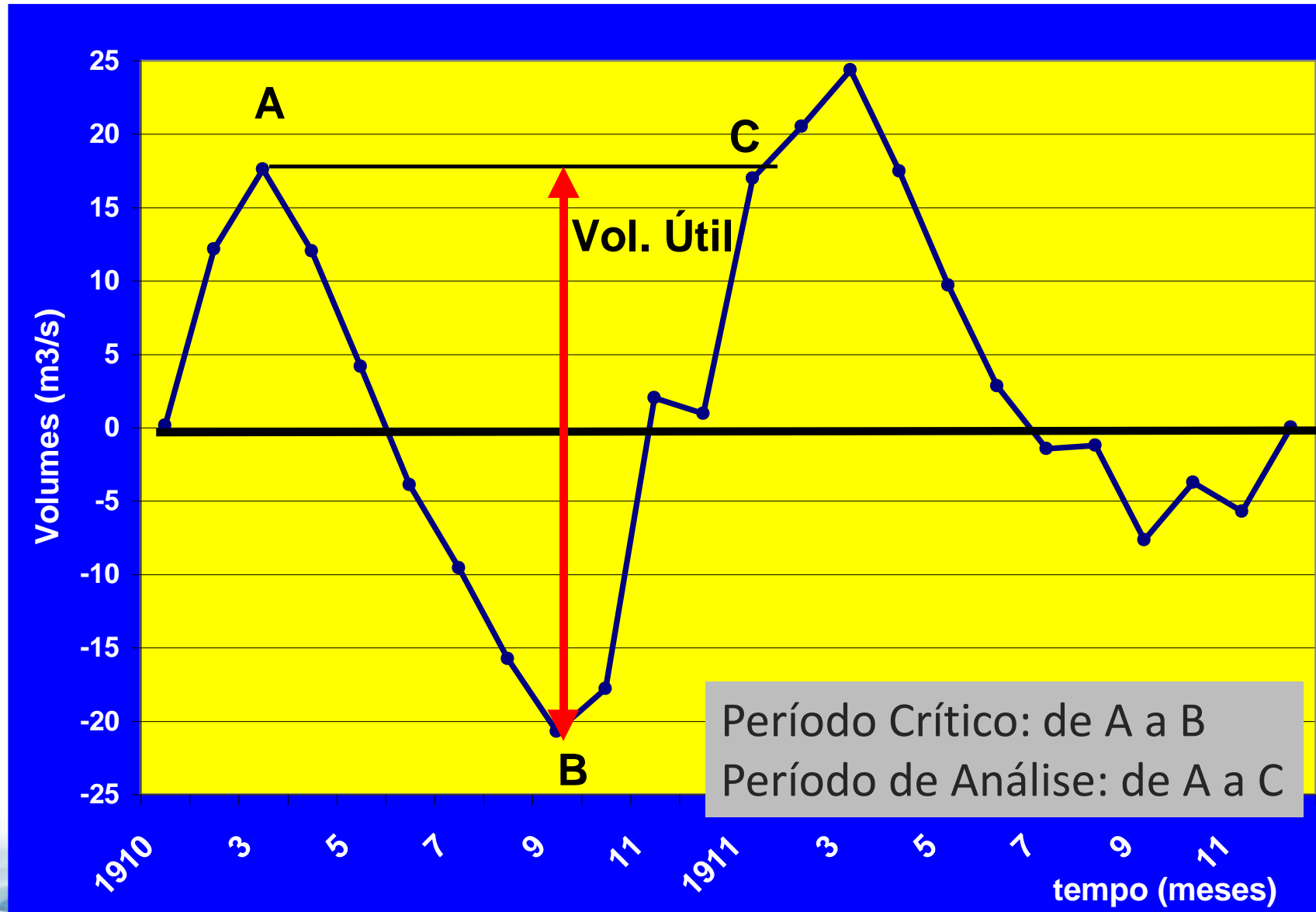


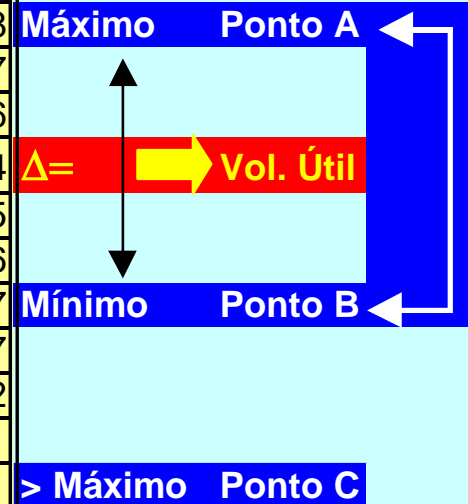
Diagrama de Diferenças Totalizadas ou Diagrama de Picos Sequenciais – Forma Analítica

Mês	Vazão	Vazão – Vazão Média	Soma das Diferenças
1	Q_1	$d_1 = Q_1 - Q_{med}$	d_1
2	Q_2	$d_2 = Q_2 - Q_{med}$	$d_1 + d_2$
3	Q_3	$d_3 = Q_3 - Q_{med}$	$d_1 + d_2 + d_3$
...
N	Q_N	$d_N = Q_N - Q_{med}$	$\sum d_i \text{ (i = 1 a N)}$

Diagrama de Diferenças Totalizadas para Vazões Regularizadas menor que a Média (Forma Analítica)

$Q_r = 10,61 \text{ m}^3/\text{s}$

Mês	Vazão (m ³ /s)	(Q-Qreg) (m ³ /s).mês	Σ (Q-Qreg) (m ³ /s).mês
0			0.00
1910	11.4	0.69	0.69
2	23.3	12.59	13.29
3	16.7	5.99	19.28
4	5.7	-5.01	14.27
5	3.4	-7.31	6.96
6	3.2	-7.51	-0.54
7	5.6	-5.11	-5.65
8	5.1	-5.61	-11.26
9	6.3	-4.41	-15.67
10	14.2	3.49	-12.17
11	31.1	20.39	8.22
12	10.2	-0.51	7.71
1911	27.3	16.59	24.31
2	14.8	4.09	28.40
3	15.1	4.39	32.79
4	4.4	-6.31	26.48
5	3.5	-7.21	19.28
6	4.4	-6.31	12.97
7	7	-3.71	9.26
8	11.5	0.79	10.05
9	4.8	-5.91	4.15
10	15.2	4.49	8.64
11	9.3	-1.41	7.23
12	17	6.29	13.53



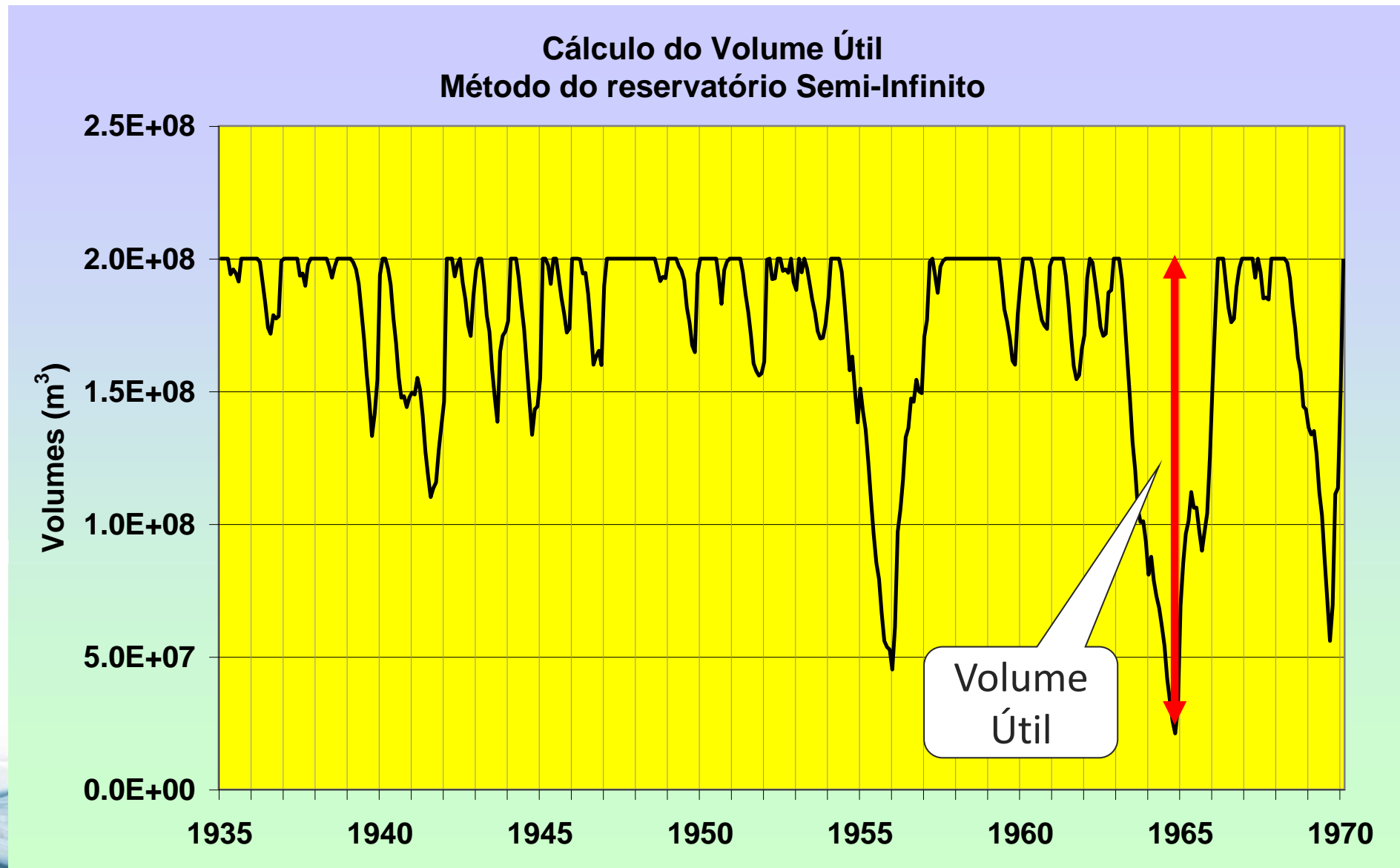
- Admite a série histórica como sendo uma repetição cíclica (não supõe séries mais ou menos críticas). Isto pode levar a sub ou super-dimensionamento do volume útil
- Não associa riscos a um volume definido
- Não permite variar a vazão regularizada em função do volume armazenado
- Não considera perdas por evaporação do reservatório
- Admite que o reservatório esteja cheio no início de sua operação
- Pode contemplar riscos, se for utilizada a técnica de geração de séries sintéticas

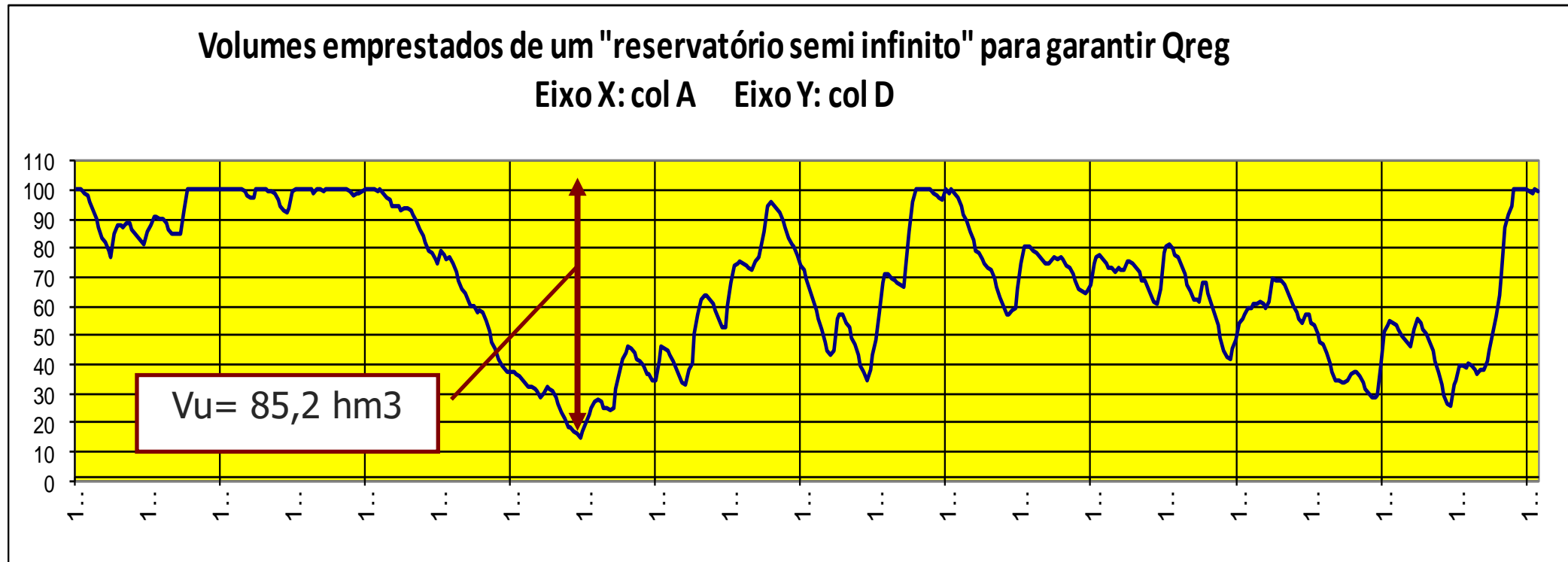
Conceito Básico:

Reservatório com volume “semi-infinito” é aquele que nunca esvazia, mas que pode extravasar.

Cálculo do volume útil

1. Admite-se um volume útil, a priori, com um valor muito grande
2. Processa-se um balanço hídrico no reservatório para todo o período de dados da série de vazões
3. O volume armazenado ao final de cada período de cálculo é o menor entre os dois valores seguintes:
4. Volume Final = Volume Inicial + Volume Afluente – Volume Efluente ou
Volume Final = Volume Útil do reservatório





■ Limitações

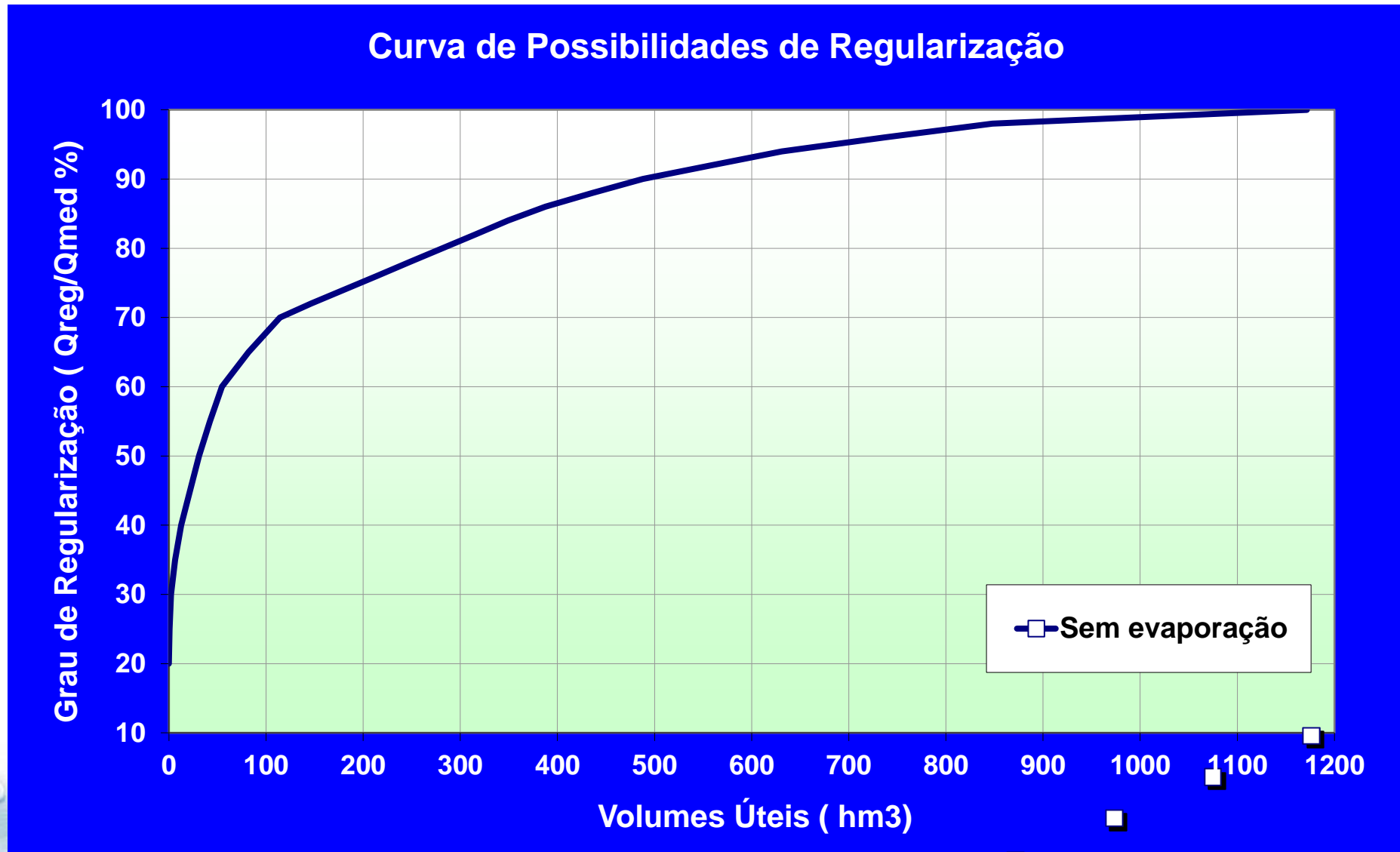
- ❑ Pela forma clássica, não considera as perdas por evaporação do reservatório
- ❑ Não permite impor regras de operação (vazões regularizadas) em função do volume armazenado, pois não se conhece a princípio seu volume real

É a relação entre a vazão regularizada e a vazão média da bacia.

$$GR = Q_{\text{regularizada}}/Q_{\text{média}}$$

Curva de Possibilidades de Regularização

- É uma curva que relaciona a vazão regularizada com o volume necessário para regularizá-la
- É extremamente útil durante as fases de planejamento de barragens
- É obtida pela planilha variando-se a vazão regularizada e anotando-se o volume útil necessário





Fim

LabSid