



Escola Politécnica

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

Universidade de São Paulo

**PHA3307 –
Hidrologia Aplicada**

Regularização de Vazões

Aula 16

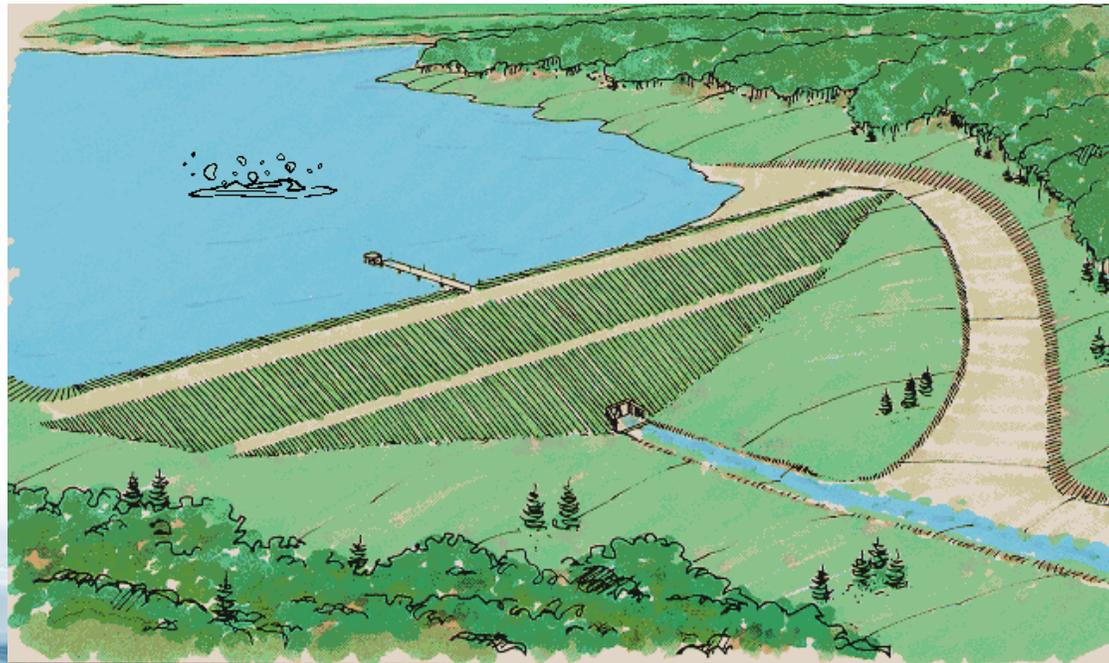
**Prof. Dr. Arisvaldo Mélo
Prof. Dr. Joaquin B. Garcia**

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



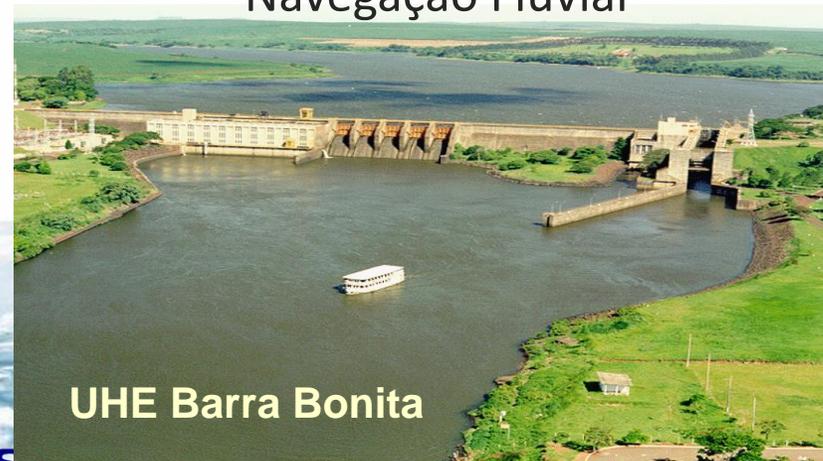
Recreação e Paisagismo



Geração de Energia



Navegação Fluvial

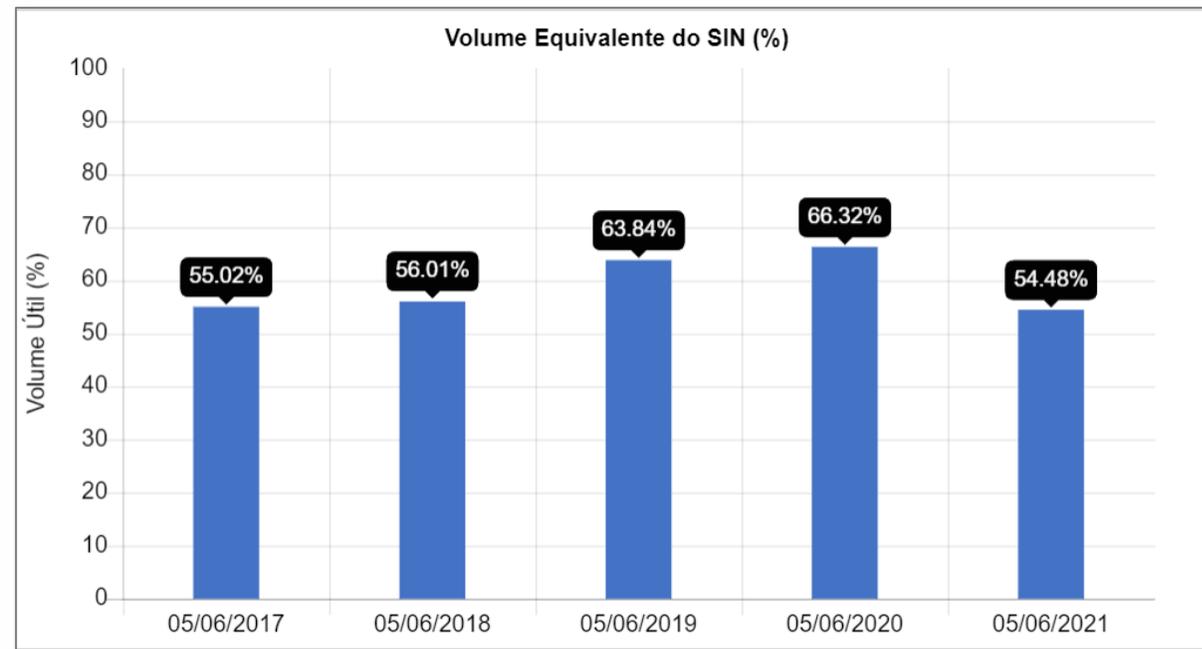


UHE Barra Bonita

Sistema Interligado Nacional

Geração de Energia

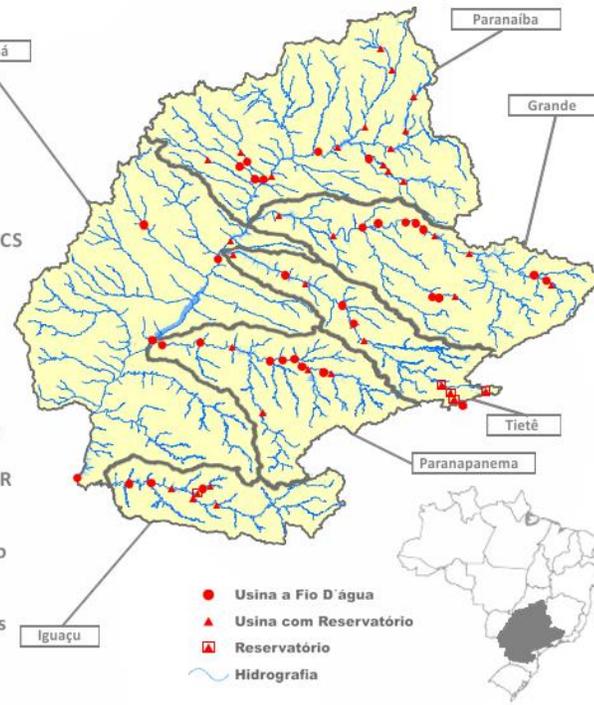
| Tipo de Aproveitamento | No |
|------------------------|----|
| Reservatório | 10 |
| Usina a Fio d'Água | 91 |
| Usina com Reservatório | 60 |
| Usina de Bombeamento | 1 |



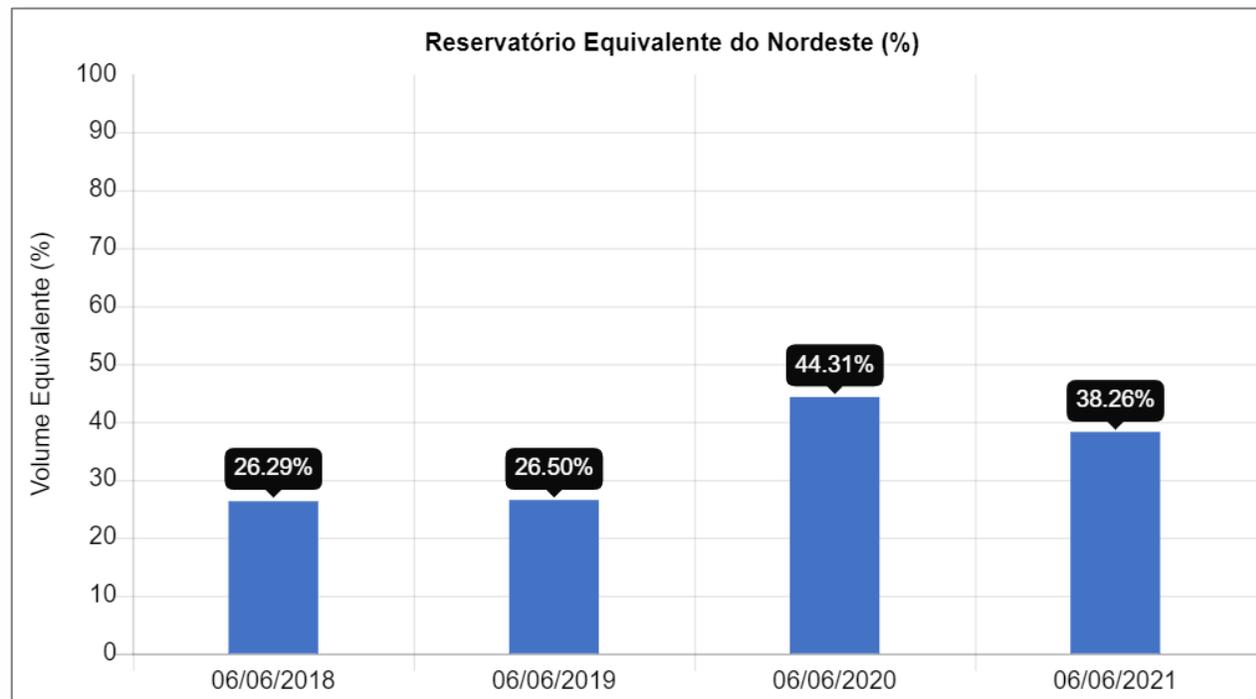
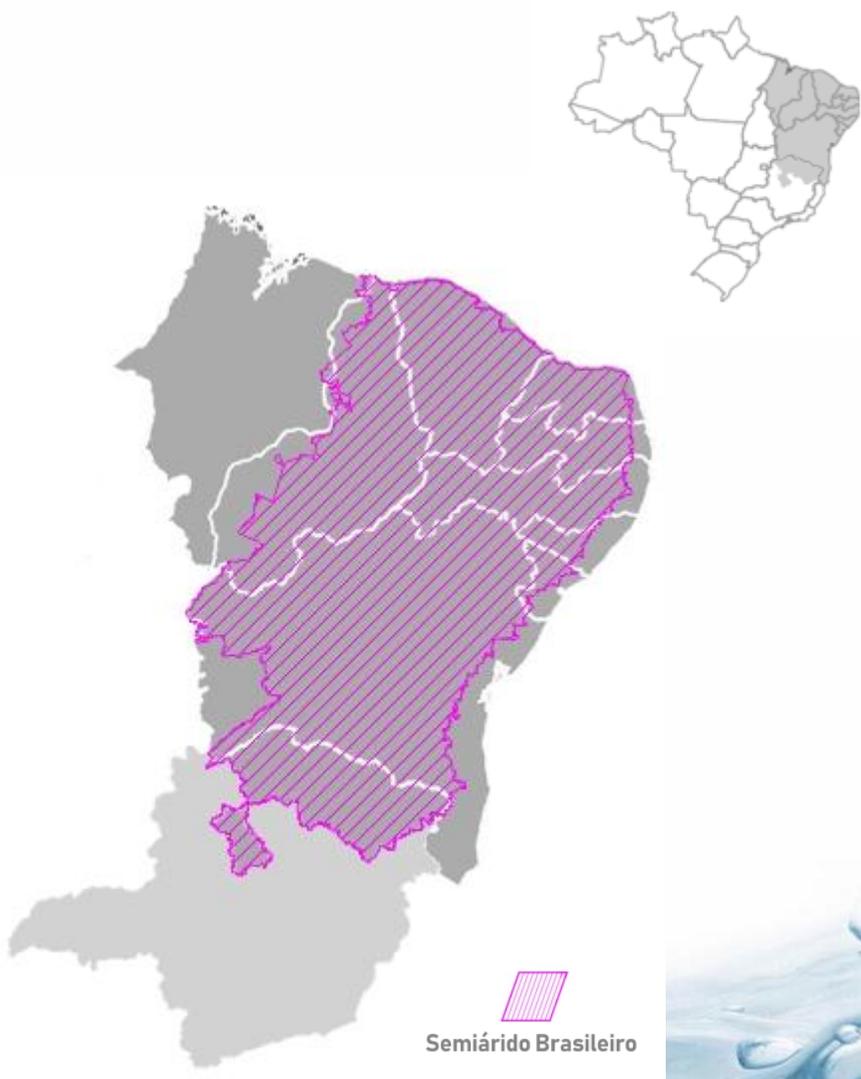
Bacia do Rio Paraná

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 Fação
- 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. Avanhandava
- Três Irmãos
- Jupia
- Porto Primavera
- Jurumirim
- Piraju
- Chavantes
- Ourinhos
- Salto Grande CS
- Canoas II
- Canoas I
- Mauá
- Capivara
- Taquaruçu
- Rosana
- Itaipu
- G. B. Munhoz
- Segredo
- Santa Clara-PR
- Fundão
- Jordão
- Salto Santiago
- Salto Osorio
- 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 |

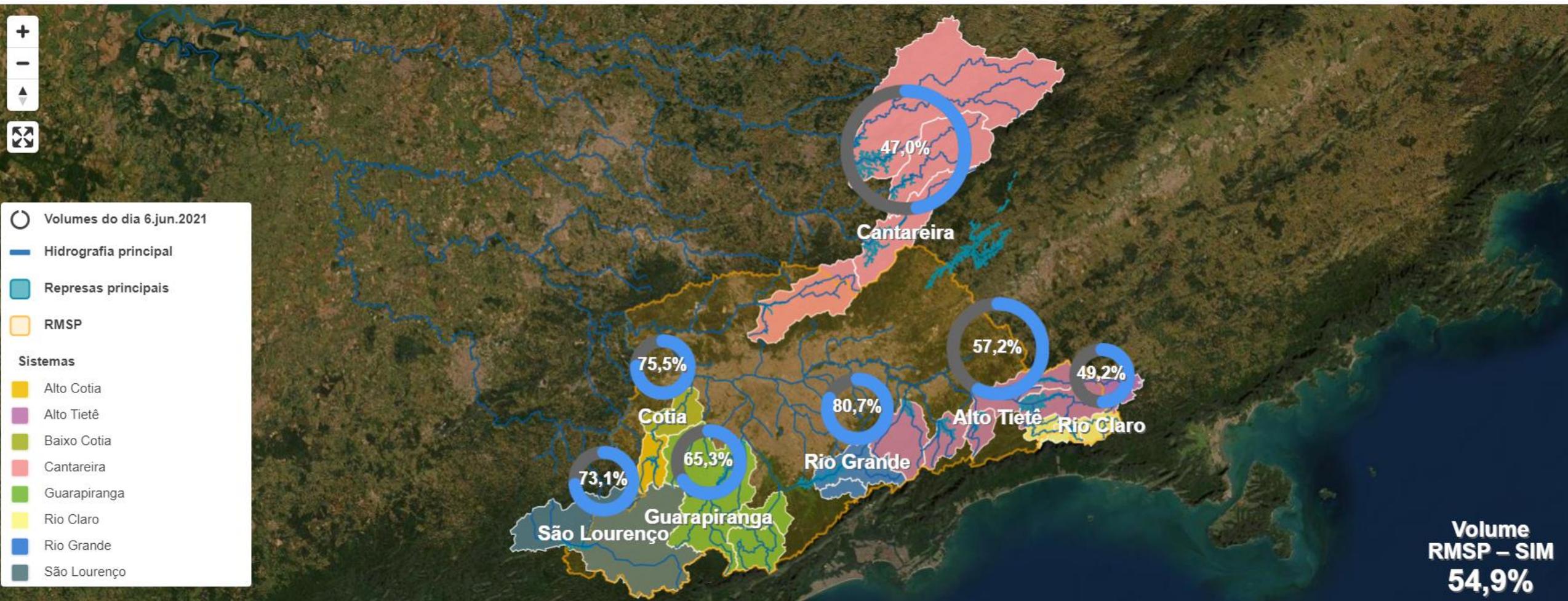
Fonte: ANA, 2020

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

Dados de: 06/06/2021

HidroMapas

Volume dos Sistemas

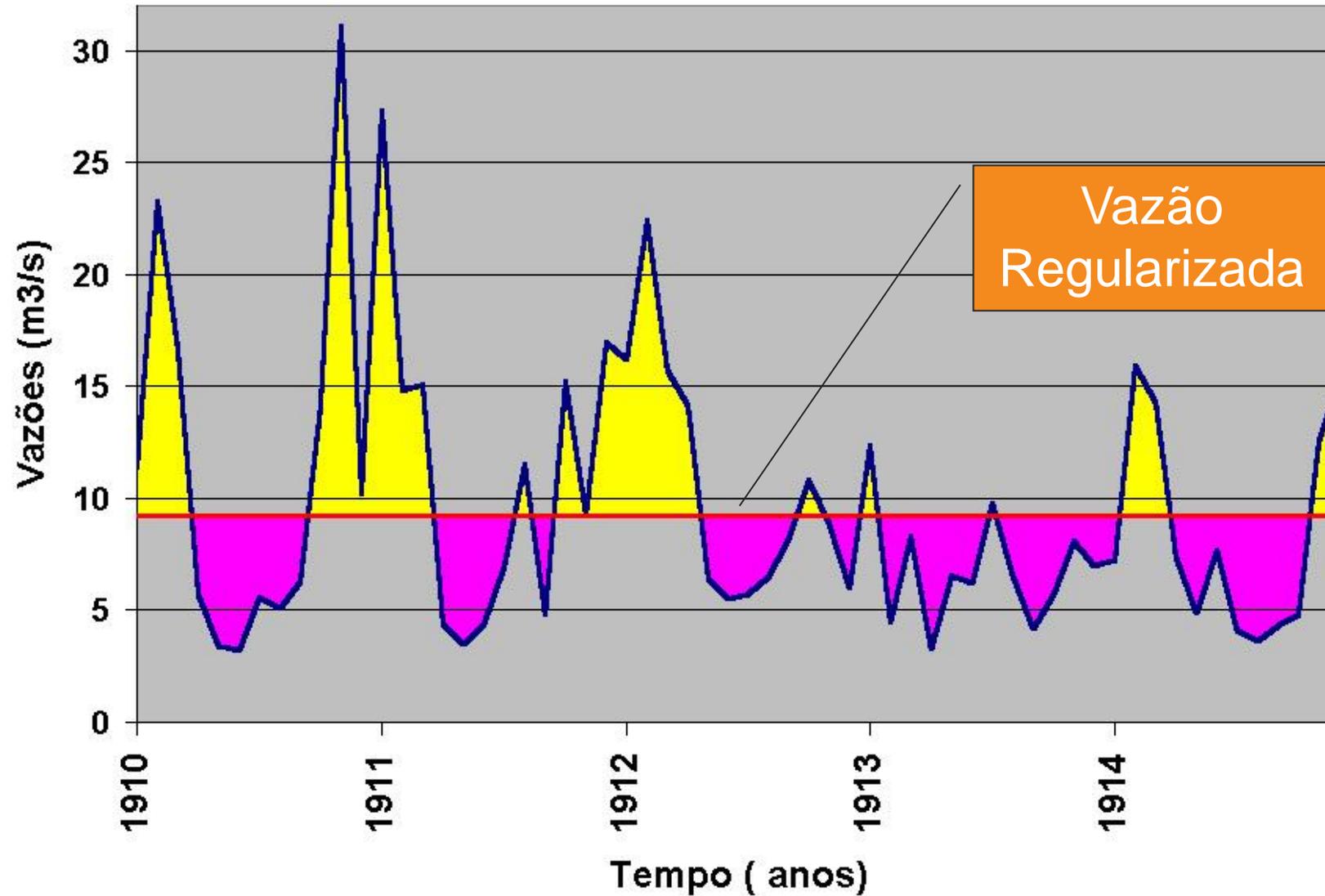


Domingo, 06 de Junho de 2021
Gerado às 08:26 hs de 06/06/2021

Condições de Armazenamento dos Mananciais que Abastecem a RMSP.

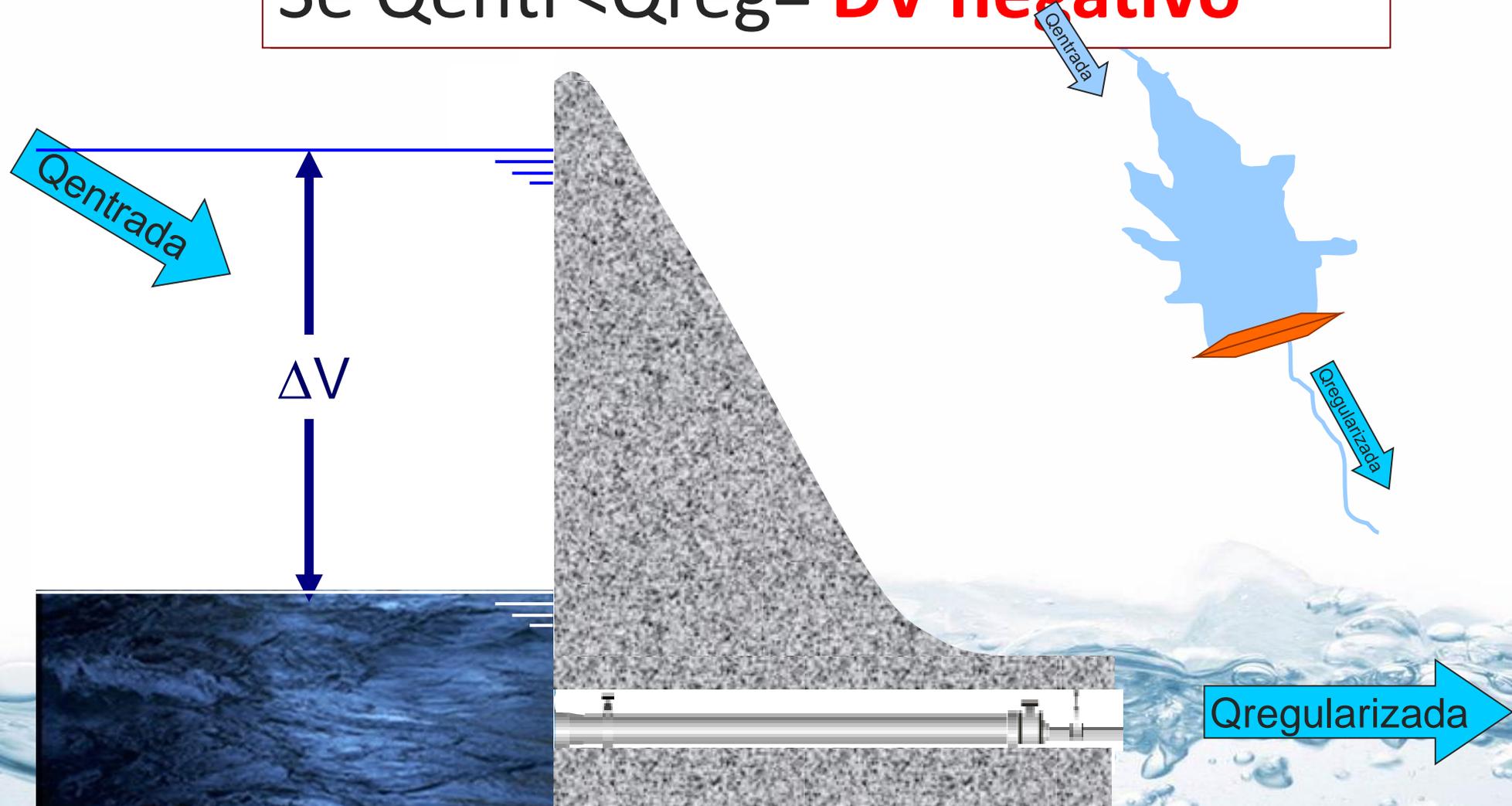
| Sistema | Nível às 7h (m) | Volume Operacional | | | | Vazão | | | | | | Vazão Captada ETA | | Qcaptada + Qdescarga diária (m³/s) |
|----------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|---|
| | | às 7h (x10 ⁶ m³) | índice (%) | var. dia (%) | máximo (x10 ⁶ m³) | Qaflluente 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>Atibaíinha</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.



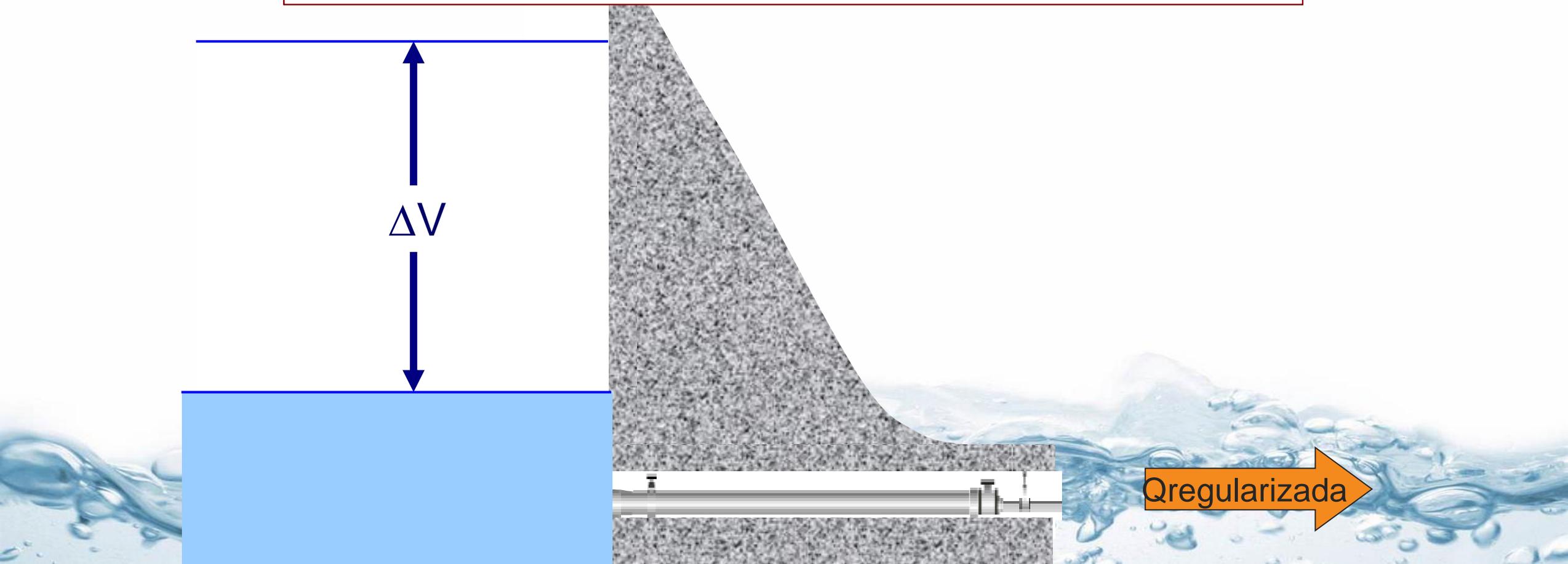
$$(Q_{\text{entr}} - Q_{\text{reg}}) Dt = \Delta V$$

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



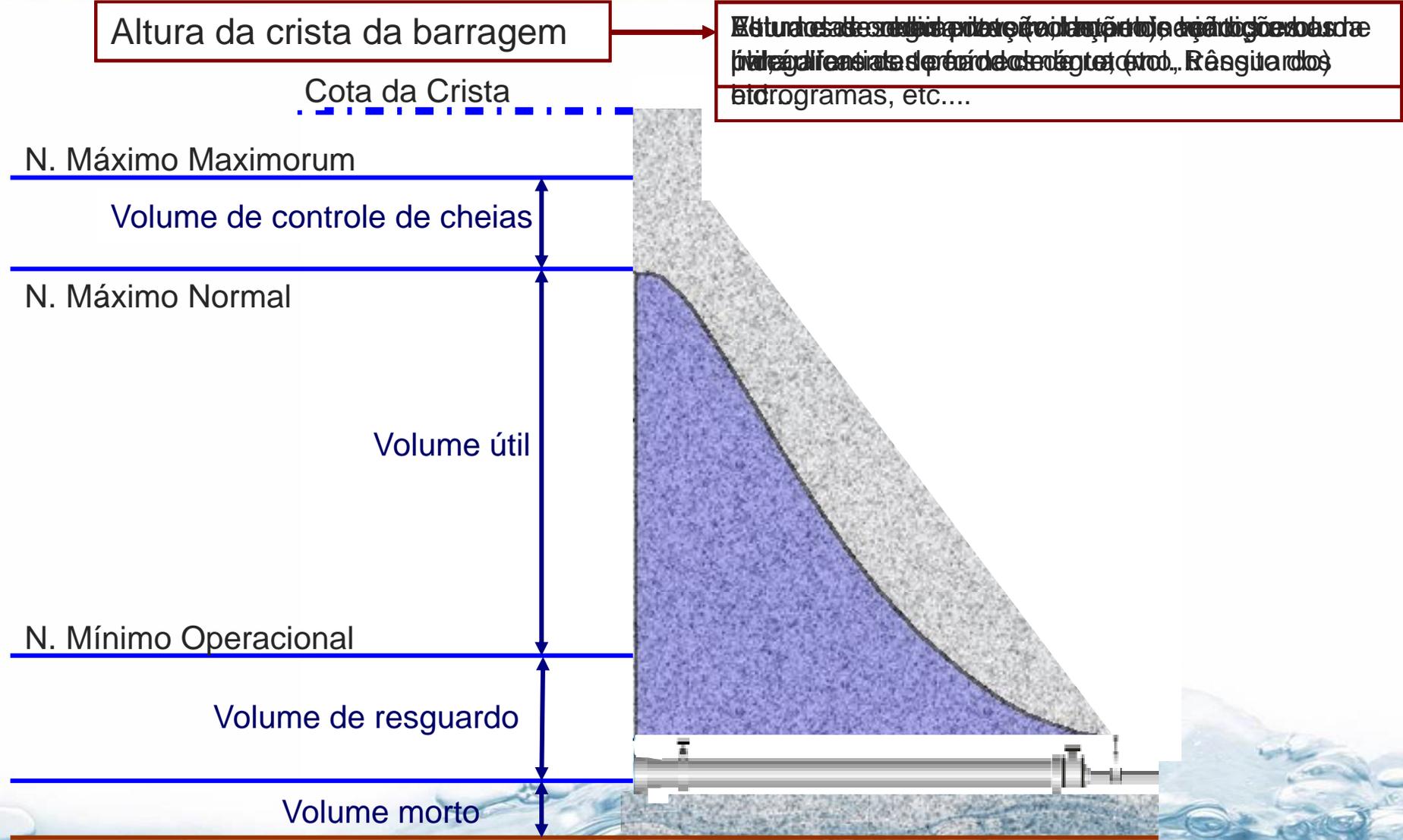
$$(Q_{entr} - Q_{reg}) Dt = \Delta V$$

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



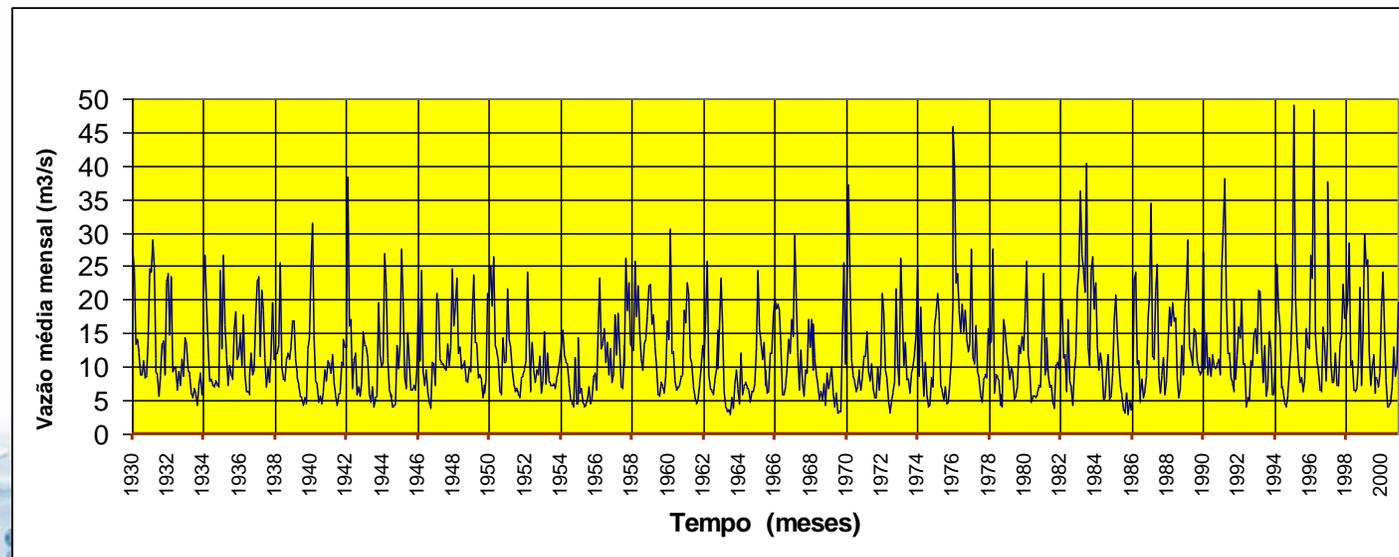
- O Vu está diretamente associado aos benefícios da obra
- O Vu influi nas dimensões da obra (custos)
- O Vu influi na área inundada (impactos ambientais e sociais)
- Nem sempre se pode contar com o Vu necessário (análise de riscos)

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

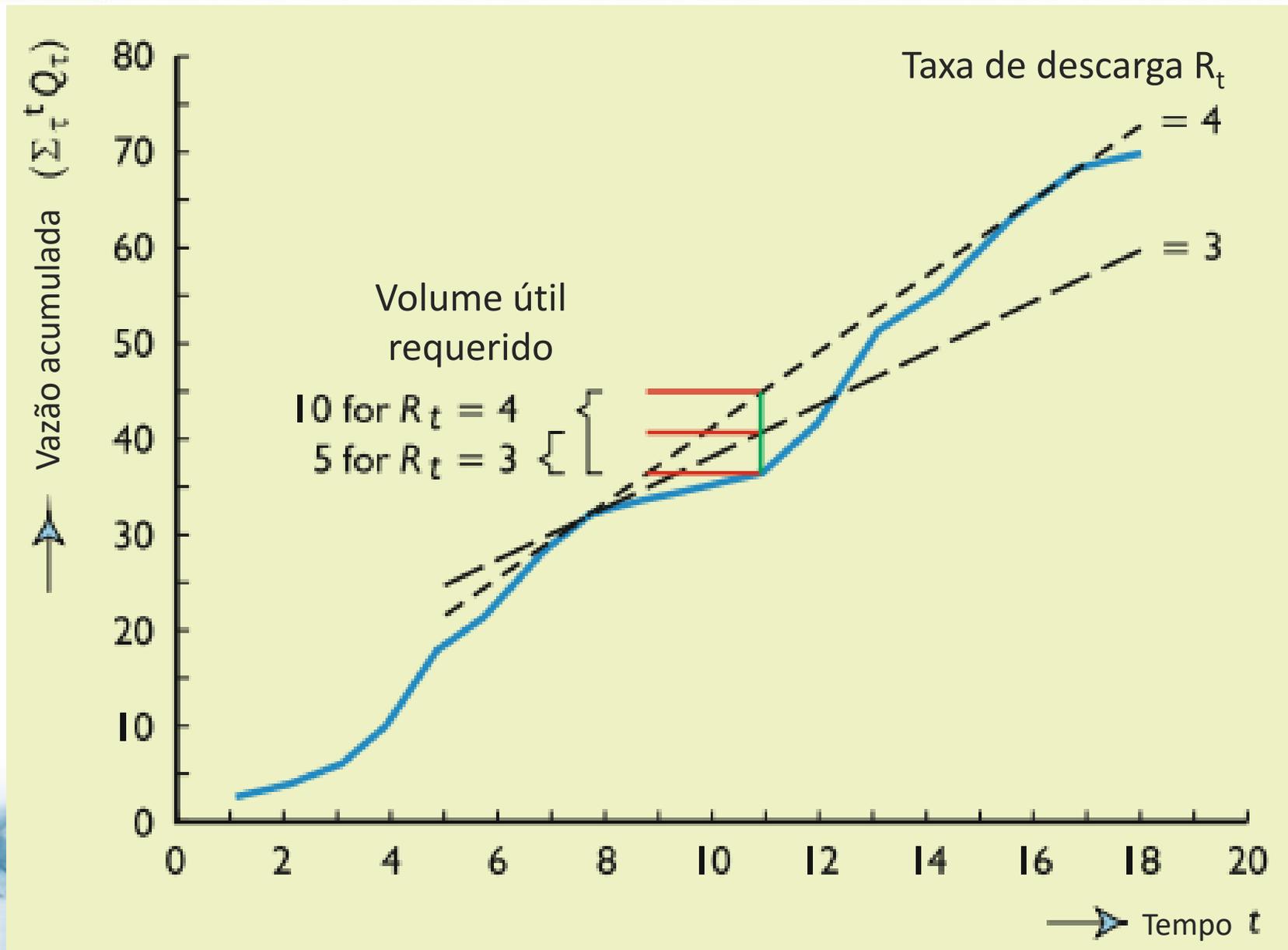
Modelos de Otimização

Métodos Empíricos

Métodos Estatísticos

UHE ITAIPU

LABSUD

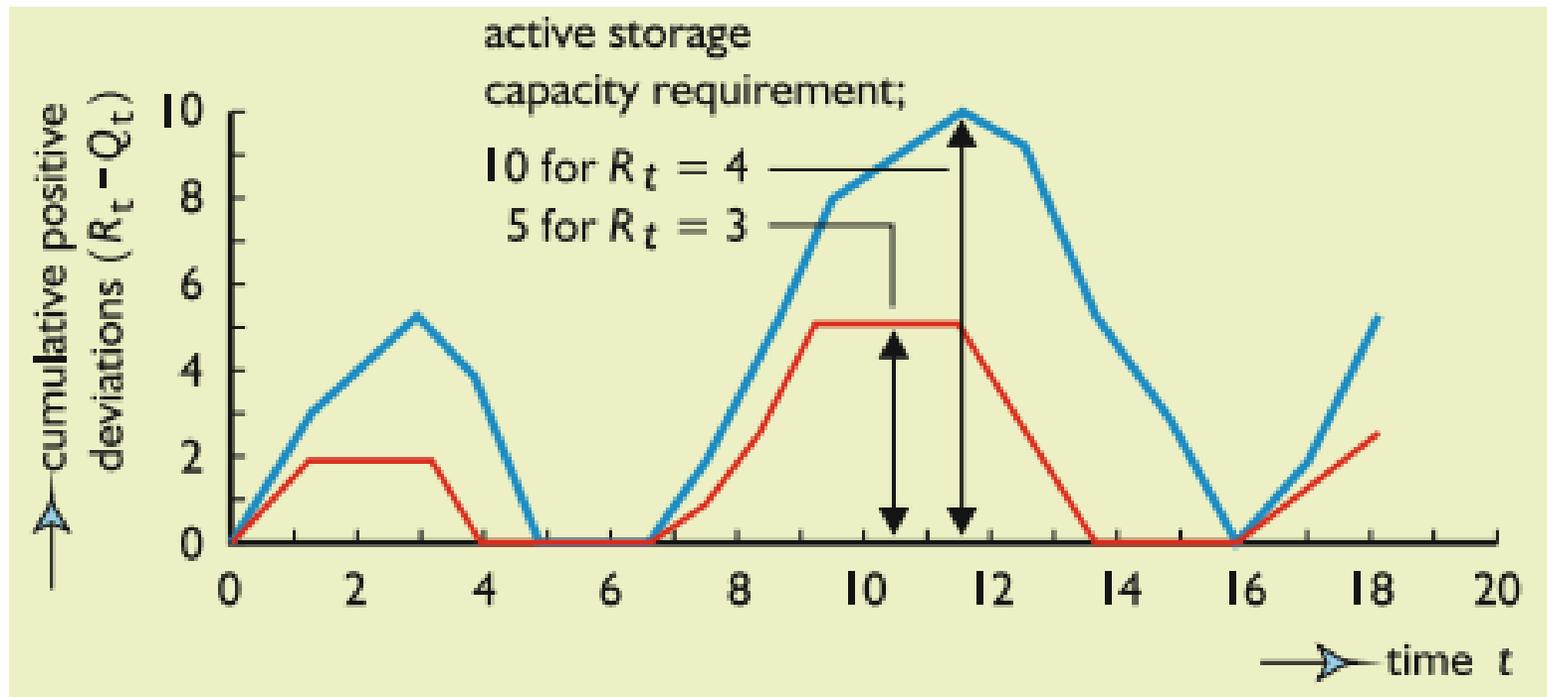


$$V_u = \text{máximo} \left[\sum_{t=1}^{2T} (R_t - Q_t) \right]$$

$2T$ – 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

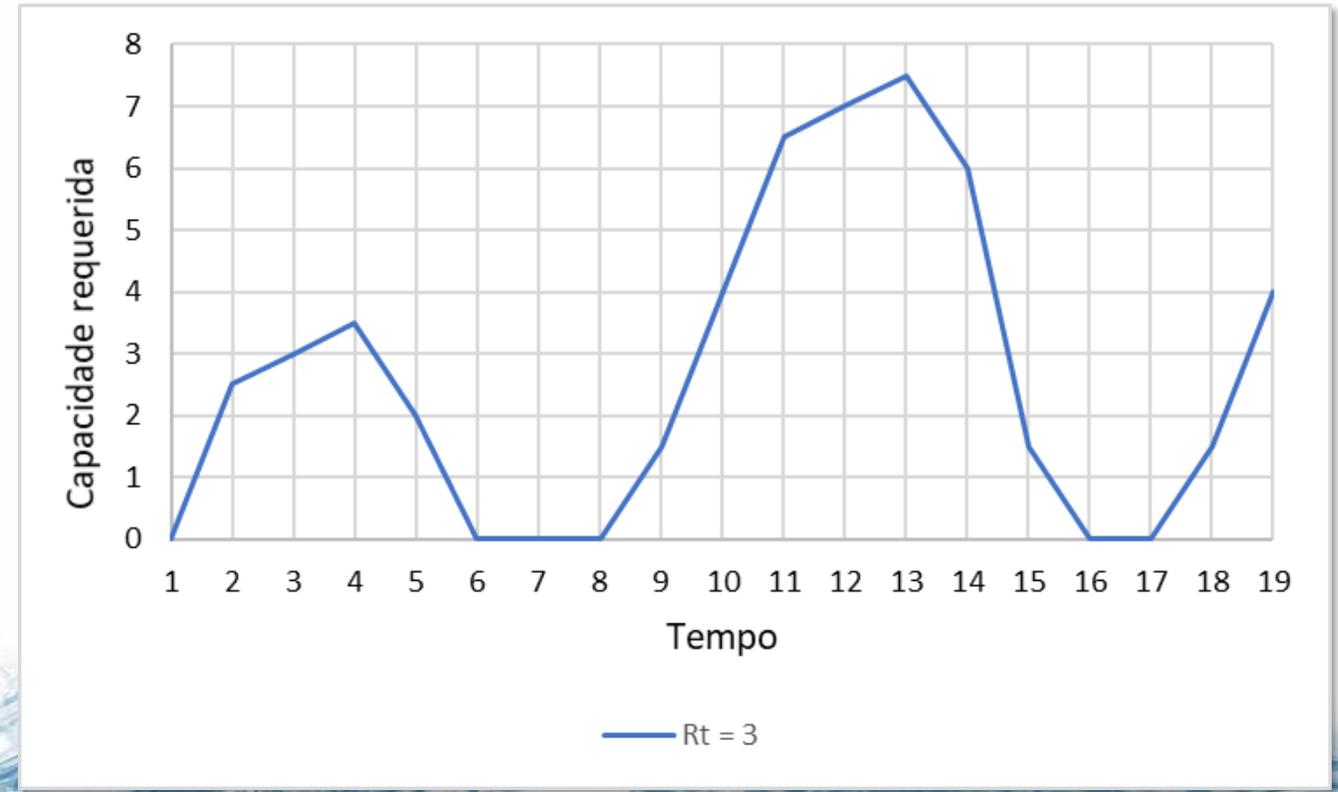
| | |
|---|-----------------------|
| 1 | 3.5 - 1.0 + 0.0 = 2.5 |
| 2 | 3.5 - 3.0 + 2.5 = 3.0 |
| 3 | 3.5 - 3.0 + 3.0 = 3.5 |
| 4 | 3.5 - 5.0 + 3.5 = 2.0 |
| 5 | 3.5 - 8.0 + 2.0 = 0.0 |
| 6 | 3.5 - 6.0 + 0.0 = 0.0 |
| 7 | 3.5 - 7.0 + 0.0 = 0.0 |
| 8 | 3.5 - 2.0 + 0.0 = 1.5 |
| 9 | 3.5 - 1.0 + 1.5 = 4.0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

Segundo período

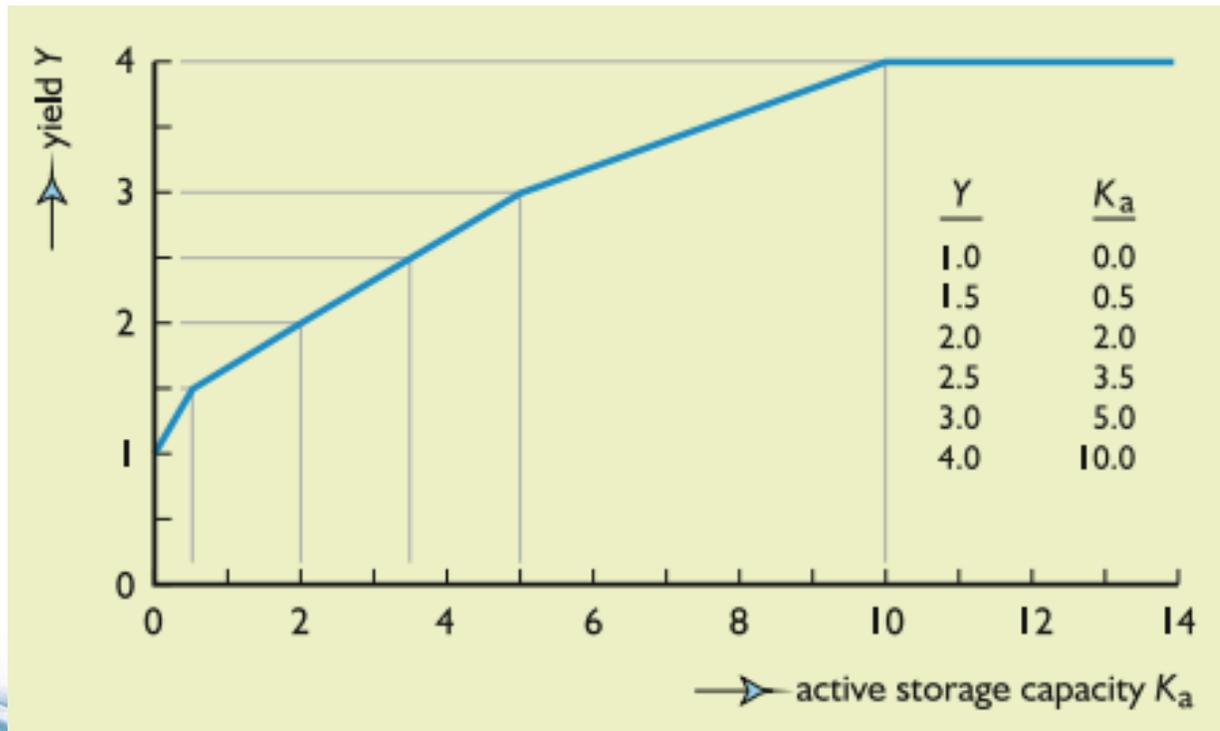
| | |
|---|-----------------------|
| 1 | 3.5 - 1.0 + 4.0 = 6.5 |
| 2 | 3.5 - 3.0 + 6.5 = 7.0 |
| 3 | 3.5 - 3.0 + 7.0 = 7.5 |
| 4 | 3.5 - 5.0 + 7.5 = 6.0 |
| 5 | 3.5 - 8.0 + 6.0 = 1.5 |
| 6 | 3.5 - 6.0 + 1.5 = 0.0 |
| 7 | 3.5 - 7.0 + 0.0 = 0.0 |
| 8 | 3.5 - 2.0 + 0.0 = 1.5 |
| 9 | 3.5 - 1.0 + 1.5 = 4.0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

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)



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

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

$$V_t \leq K$$

$$R_t \geq Y$$

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

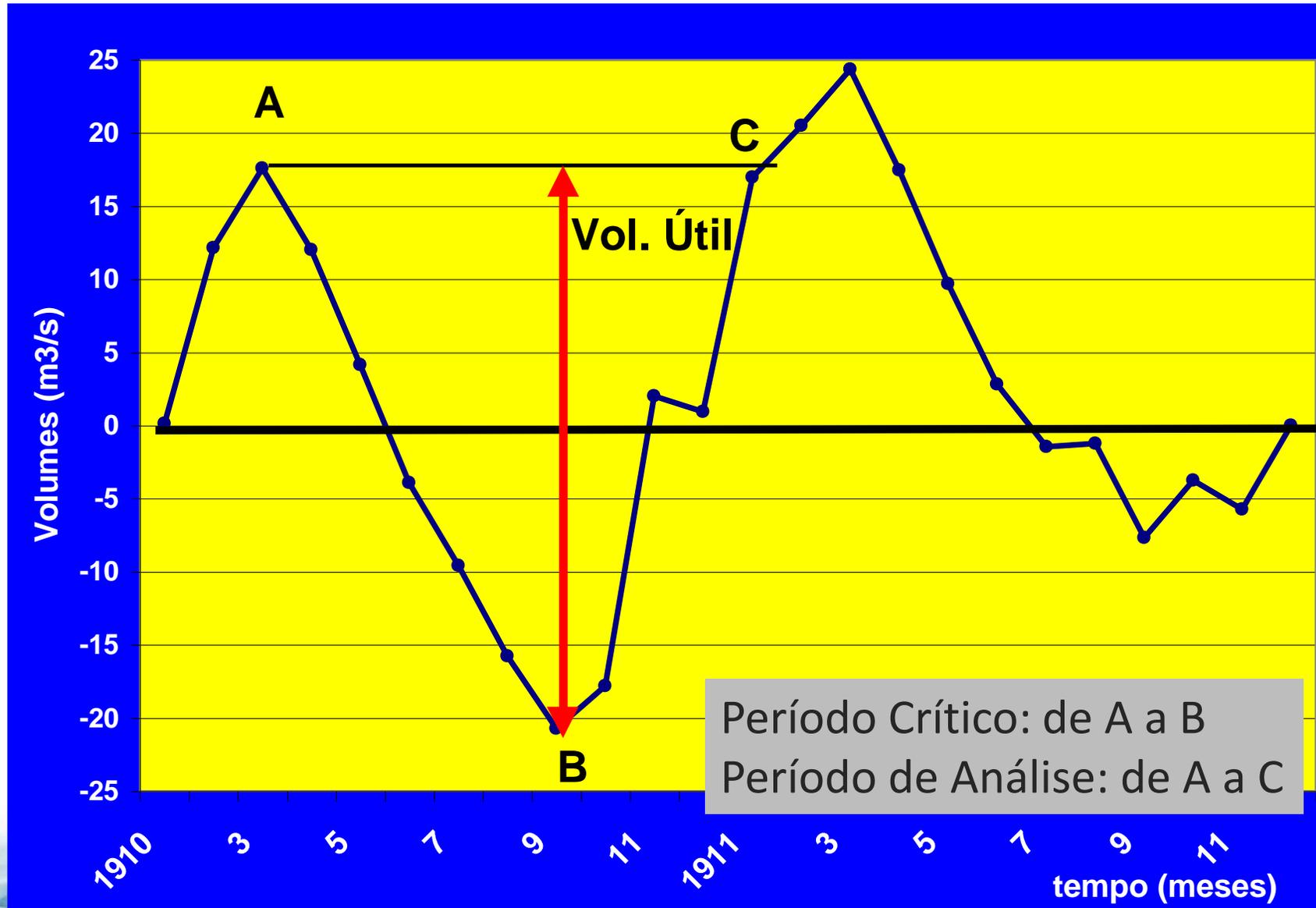


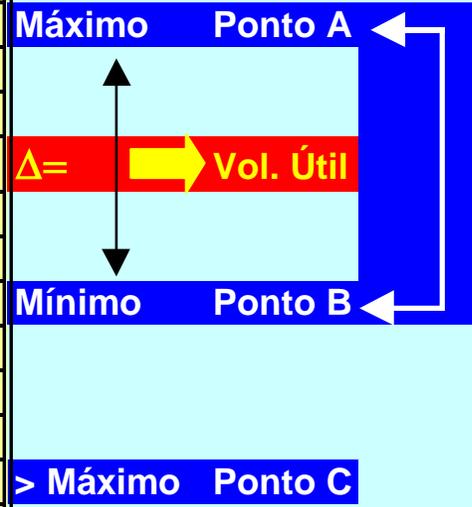
Diagrama de Diferenças Totalizadas ou Diagrama de Picos Sequenciais – Forma Analítica

| 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 | $d_N = Q_N - Q_{med}$ | $\sum d_i \text{ (} i = 1 \text{ a } N \text{)}$ |

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-Q _{reg}) (m ³ /s).mês | Σ (Q-Q _{reg}) (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 |



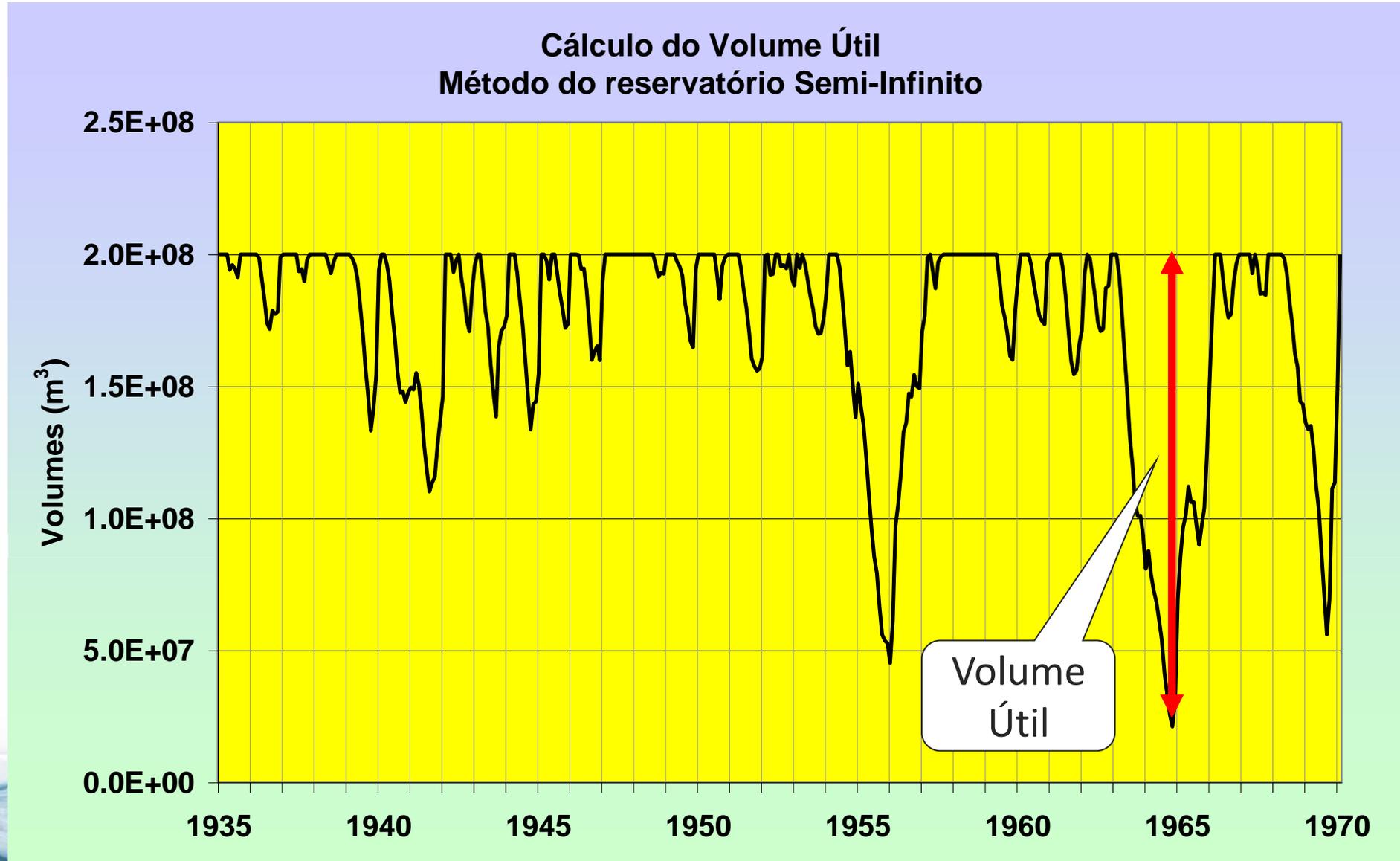
- Admite a série histórica como sendo uma repetição cíclica (não supõe séries mais ou menos críticas). Isto pode levar a sub ou super-dimensionamento do volume útil
- Não associa riscos a um volume definido
- Não permite variar a vazão regularizada em função do volume armazenado
- Não considera perdas 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

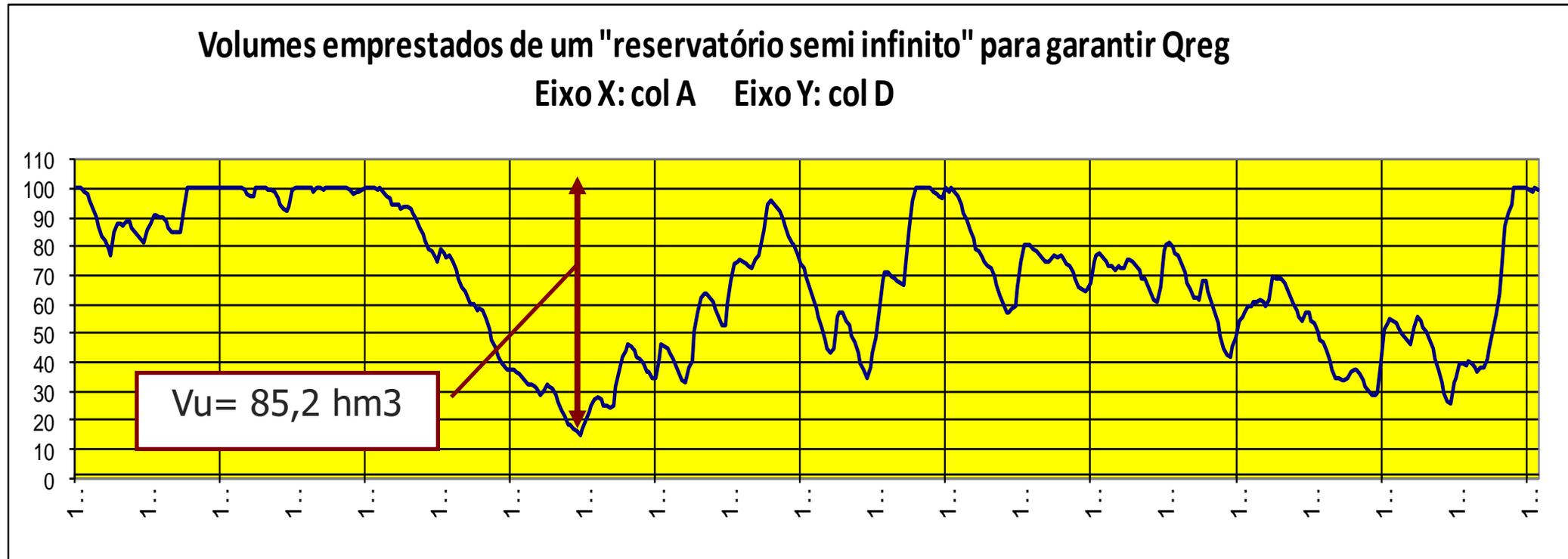
Conceito Básico:

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

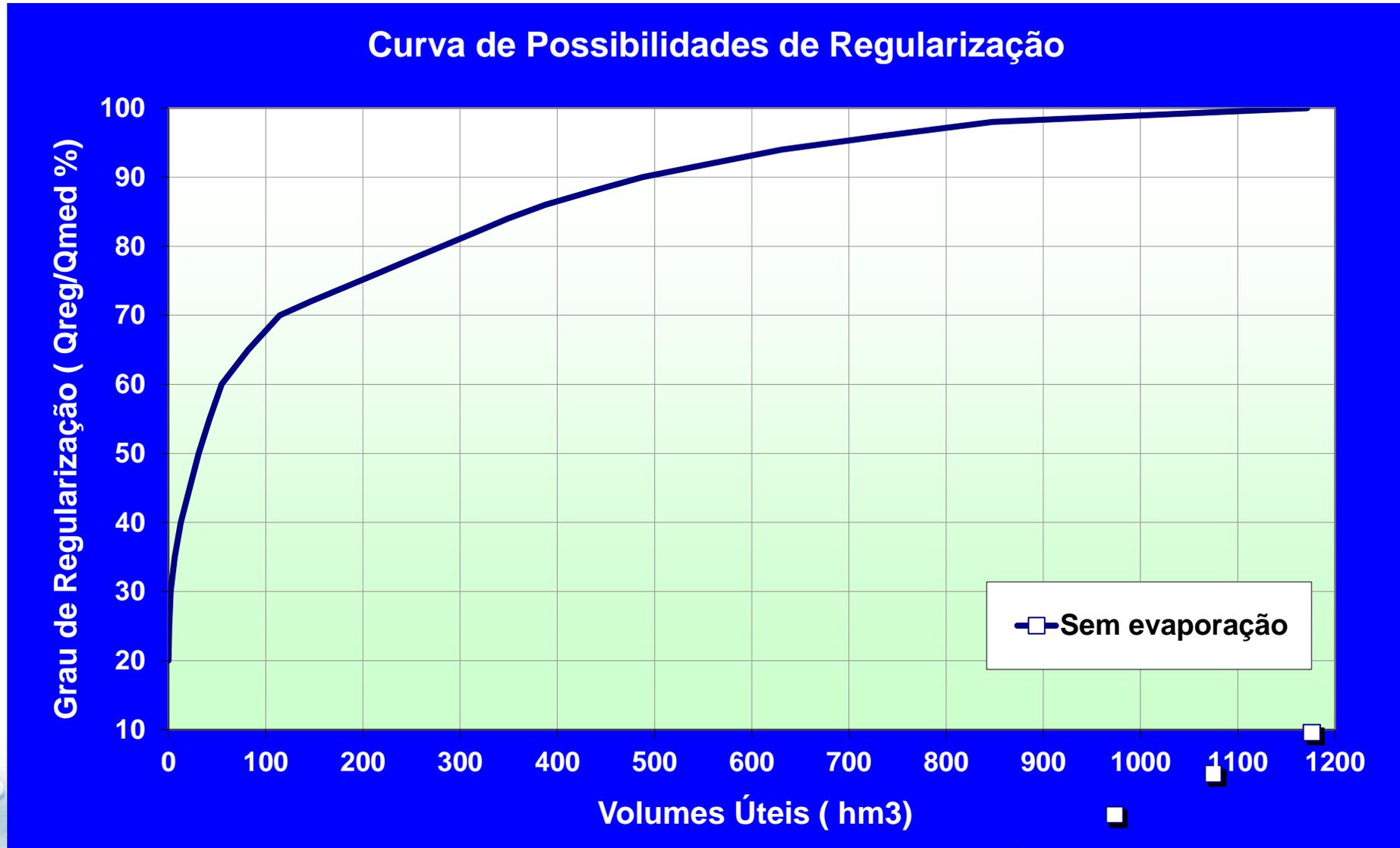
- ❑ Pela forma clássica, não considera as perdas por evaporação do reservatório
- ❑ Não permite impor regras de operação (vazões regularizadas) em função do volume armazenado, pois não se conhece a princípio seu volume real

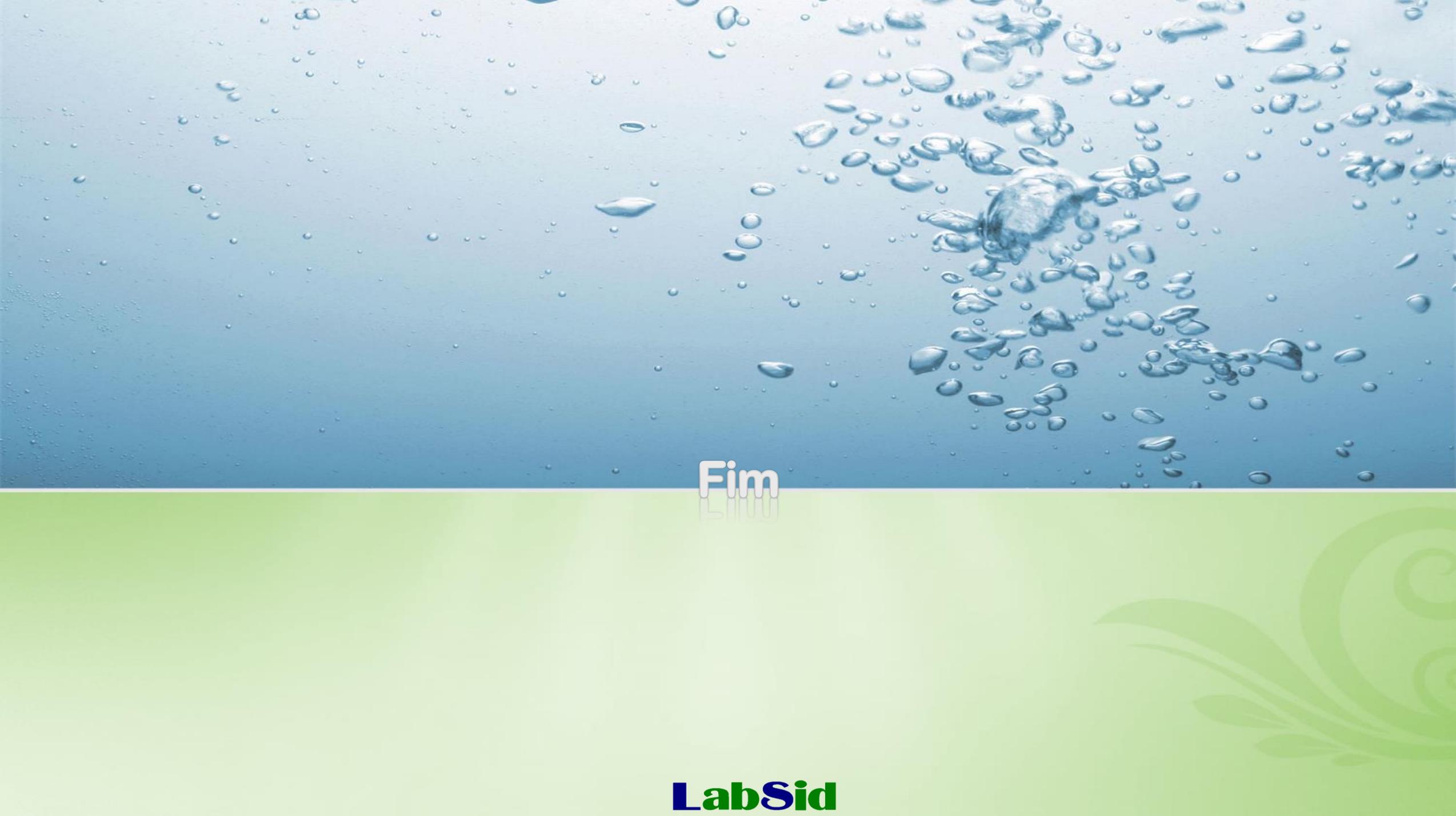
É a relação entre a vazão regularizada e a vazão média da bacia.

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

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