
Processos Hidrológicos

CST 318 / SER 456

Tema 8 - Métodos estatísticos aplicados à hidrologia
ANO 2017

Camilo Daleles Rennó

Laura De Simone Borma

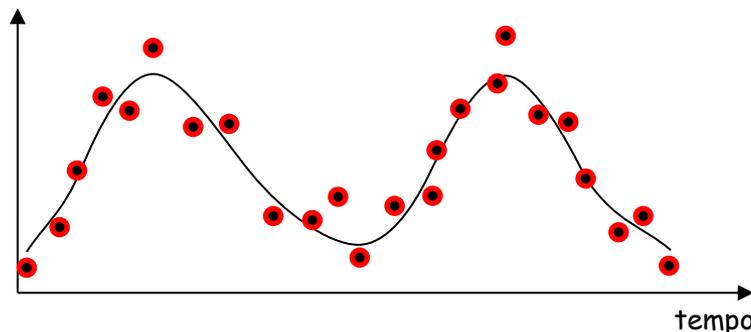
<http://www.dpi.inpe.br/~camilo/prochidr/>

Caracterização de Fenômenos Hidrológicos

Os fenômenos hidrológicos ocorrem como funções (ou processos) do tempo, ou do espaço, ou de ambos, em escalas que vão desde local até global, passando pela escala de bacia hidrográfica.

Os processos relacionados ao ciclo hidrológico podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos (probabilísticos).

De modo geral, todos os processos hidrológicos contém algum componente estocástico, e estão quase sempre associados a algum componente determinístico relacionado a alguma regularidade ou padrão que pode explicar parcialmente o fenômeno estudado.



Variáveis Hidrológicas

As variações temporais e/ou espaciais dos fenômenos do ciclo da água podem ser descritas pelas variáveis hidrológicas.

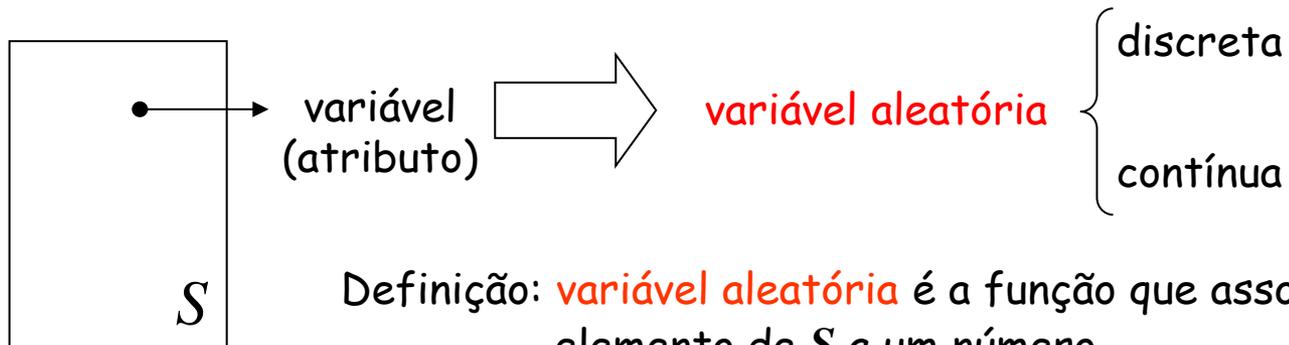
As variáveis hidrológicas podem ser quantitativas ou qualitativas, sendo que as quantitativas podem ser divididas em contínuas ou discretas, e as qualitativas em nominais ou ordinais.

Exemplos:

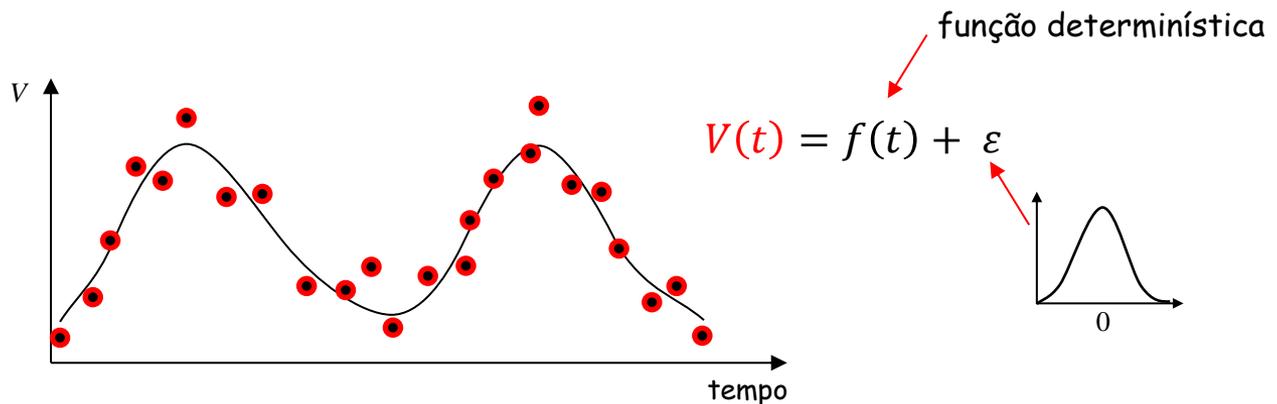
- Vazão
quantitativa contínua
- Número de enchentes no ano
quantitativa discreta
- Tipo de água (branca, preta ou clara)
qualitativa nominal
- Intensidade da chuva (nula, fraca, média, forte, extrema)
qualitativa ordinal

Variáveis Hidrológicas

Por estarem associadas a processos estocásticos, estas variáveis podem ser descritas por distribuições de probabilidade e por isso podem ser tratadas como **variáveis aleatórias**.

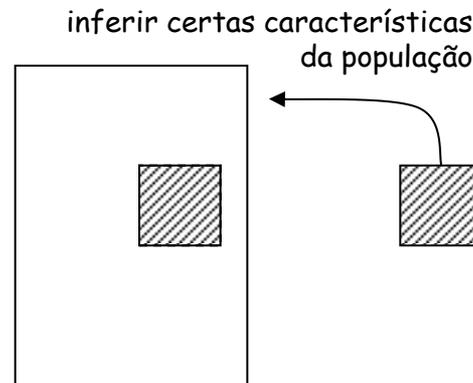


Definição: **variável aleatória** é a função que associa cada elemento de S a um número.



Variáveis Hidrológicas

Através de uma amostra, obtém-se um conjunto limitado de observações (ou realizações) tomadas em tempos e/ou locais distintos. Esta amostra pode ser usada para caracterizar ou inferir sobre o conjunto total de valores desta variável hidrológica (população).



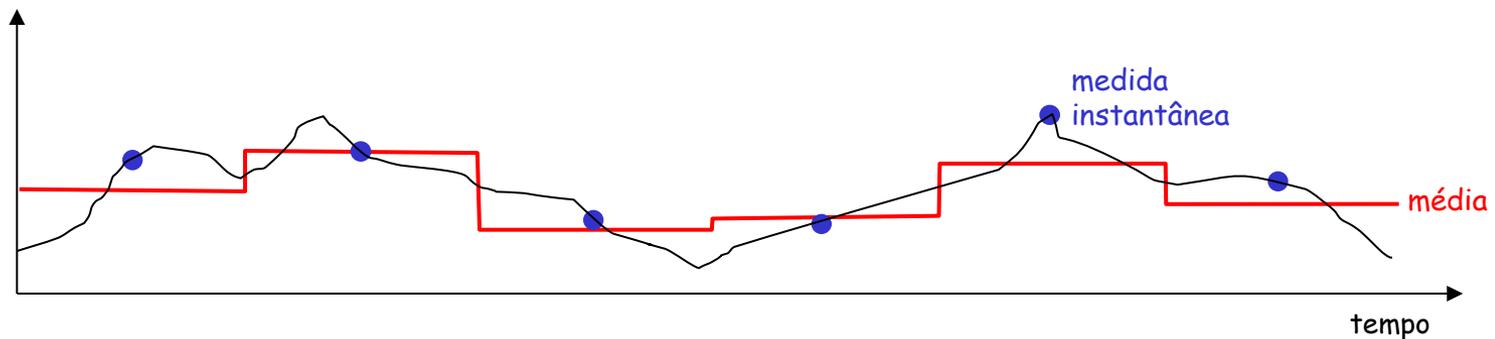
Aplicações:

- Estudar fenômenos através de estatísticas descritivas representativas
- Buscar tendências e/ou discrepâncias (anomalias)
- Realizar comparações entre variáveis
- Verificar suposições (teste de hipóteses)
- Ajustar modelos (estimação de parâmetros)

Séries Hidrológicas

Em geral, as variáveis hidrológicas são registradas por meio das chamadas séries hidrológicas, que constituem as observações organizadas no modo sequencial de sua ocorrência no tempo (ou espaço).

Mesmo para variáveis originalmente contínuas, as observações são feitas em determinados intervalos de tempo (ou de distância), em geral, regularmente espaçados. A isso dá-se o nome de **discretização**.



Séries Hidrológicas

As séries hidrológicas podem ser classificadas segundo a estacionaridade e homogeneidade.

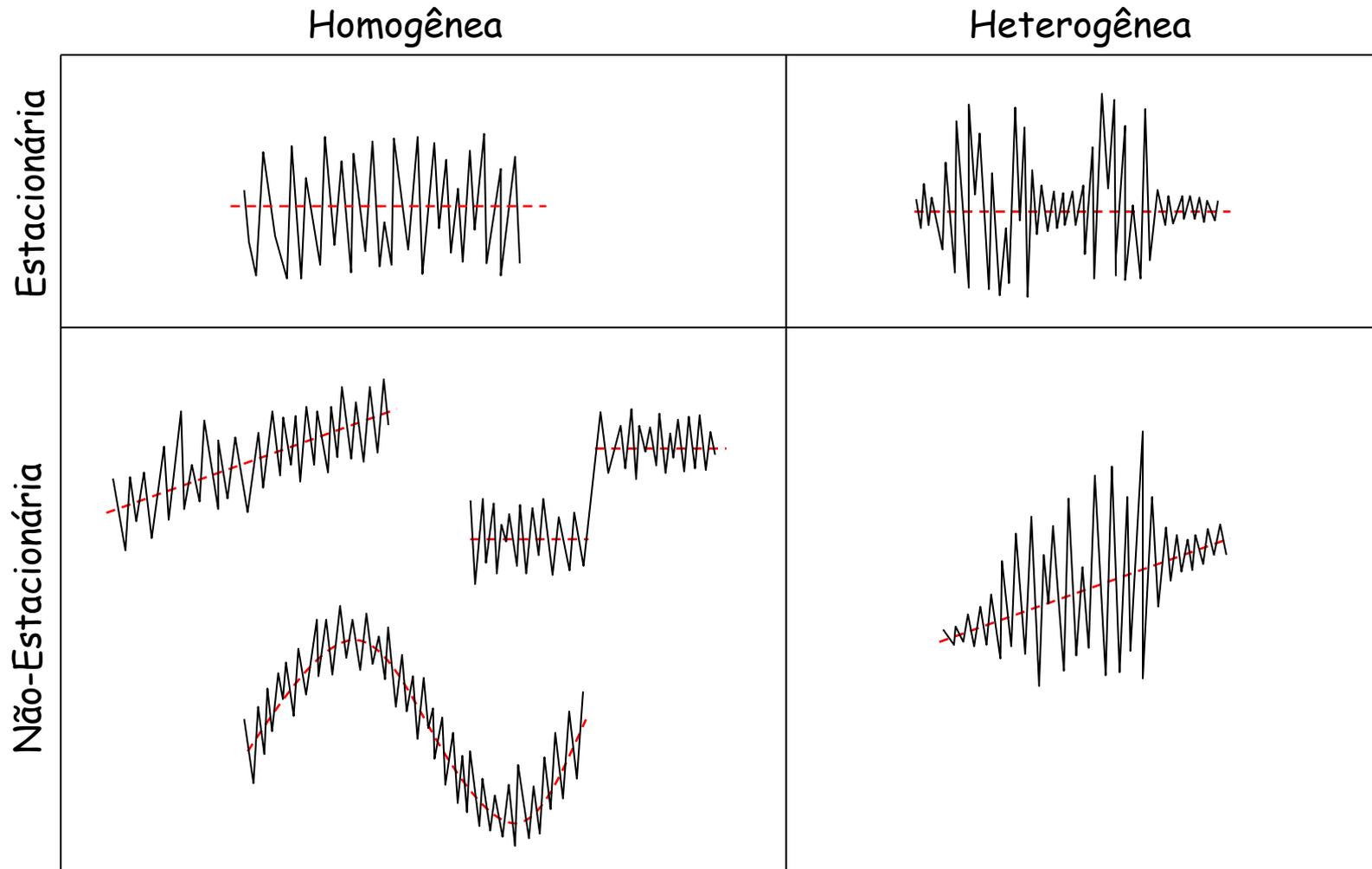
A série é considerada estacionária quando a média não se altera ao longo do tempo e é homogênea quando a variabilidade em torno da média é a mesma ao longo do tempo.

Séries não-estacionárias podem apresentar tendências de subidas ou descidas, 'saltos' ou ainda periodicidades resultantes de variações naturais ou antrópicas.

Séries não-homogêneas podem apresentar períodos com maior ou menor variabilidade, tendo ou não um caráter periódico.

Em geral, as **estatísticas clássicas** pressupõem que as variáveis sejam estacionárias e homogêneas.

Séries Hidrológicas



Análise de Séries Temporais

Os objetivos principais são:

a) Compreender os mecanismos de geração da série temporal

- Descrever o comportamento da série;
- Encontrar periodicidades na série (análise harmônica/*wavelets*);
- Tentar explicar o comportamento da série (através de variáveis auxiliares);
- Quantificar as variações aleatórias

b) Predizer comportamento futuro

- Gerar cenários
- Testar hipóteses (simulações Monte-Carlo)

Os modelos podem ser construídos no domínio do tempo (modelos autoregressivos) ou no domínio da frequência (transformadas de Fourier, *wavelets*)

A maioria das análises estatísticas clássicas pressupõe a existência de séries completas (ausência de falhas) e sem a presença de valores atípicos (*outliers*)

Análise Exploratória

Fluviograma do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba - Ano 1962/1963

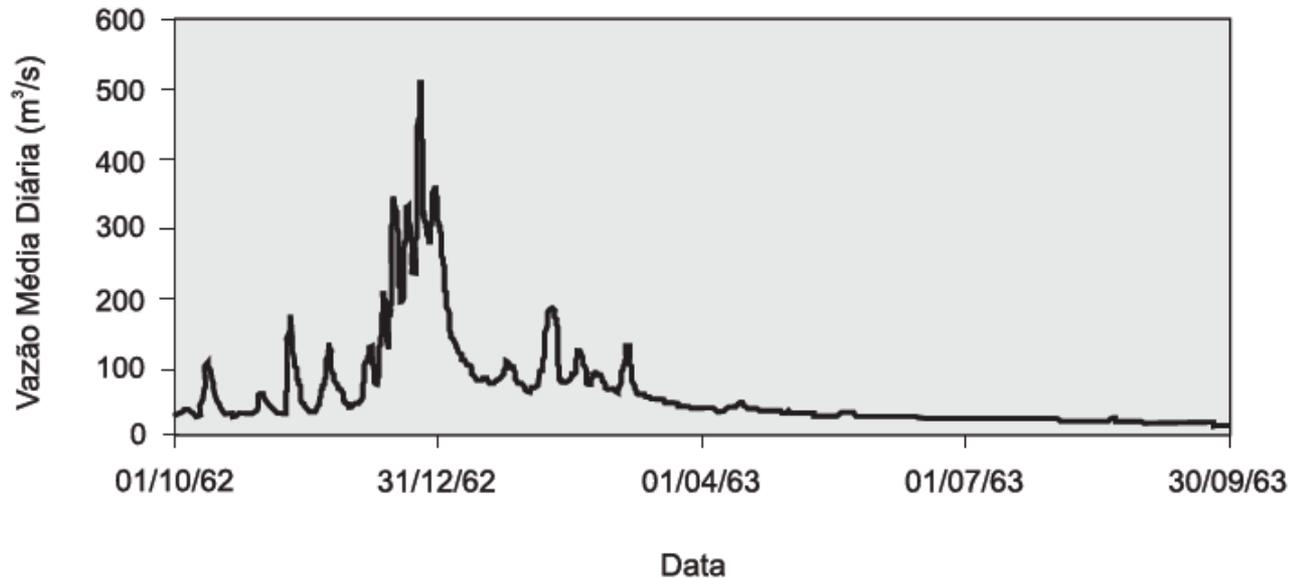


Gráfico de linha

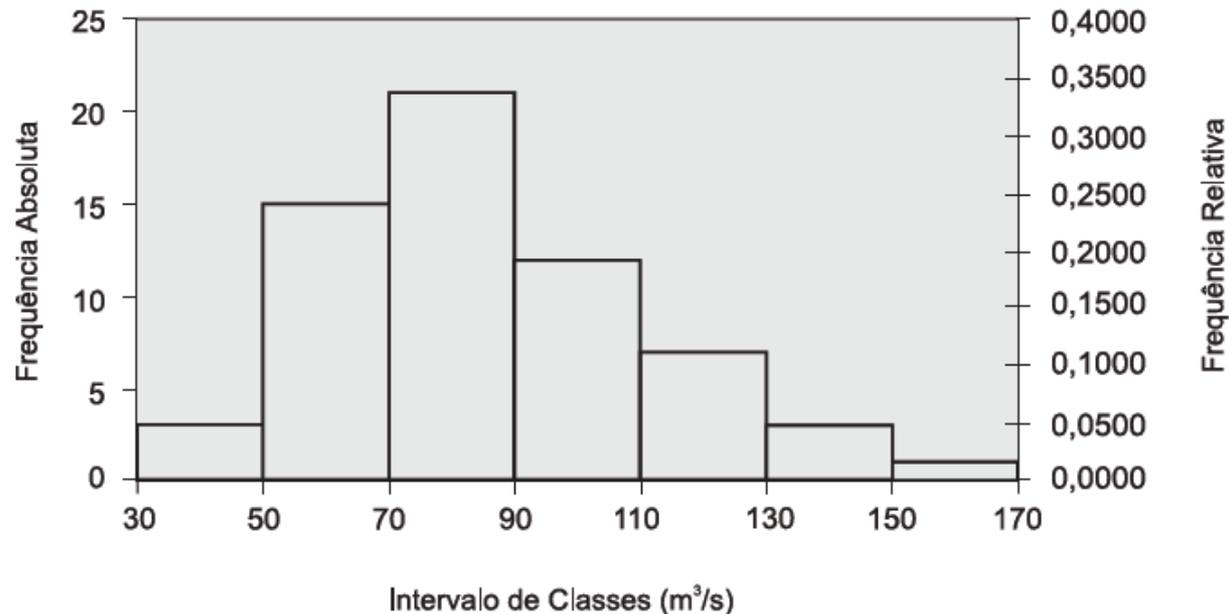
. variáveis contínuas (vazão)

Gráfico de pontos ou de barras

. variáveis discretas (chuva)

Análise Exploratória

Histograma de Vazões Médias Anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba

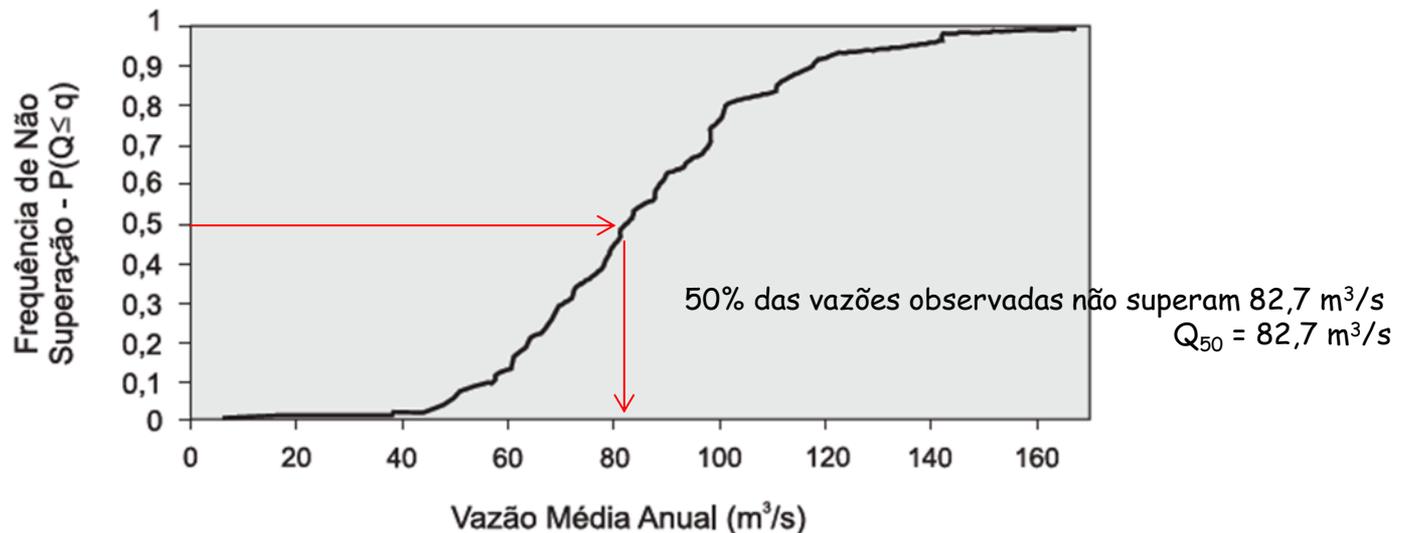


Histograma

- . frequência relativa ou absoluta (acumulada ou não)
- . para variável contínua é necessário fazer a discretização, definindo-se o número de classes (regulares ou não)

Análise Exploratória

Diagrama de Frequências Relativas Acumuladas das Vazões Médias Anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba

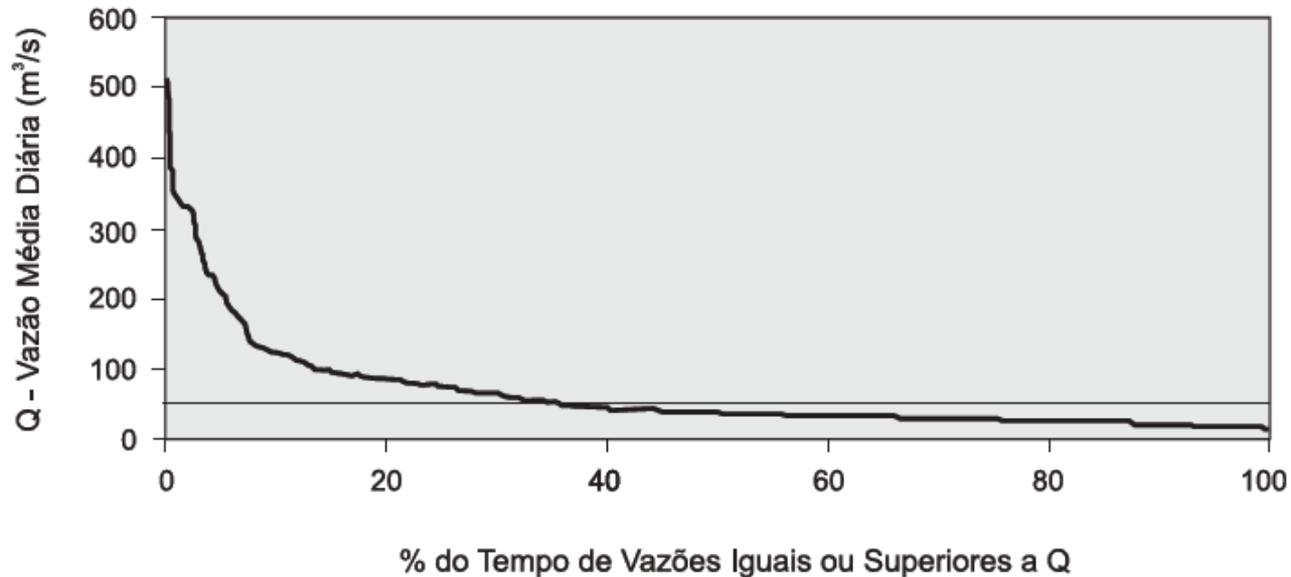


Frequência acumulada

- . ideal para variáveis contínuas
- . quanto mais uniforme a distribuição, mais a curva se aproxima de uma reta

Análise Exploratória

Curva de Permanência das Vazões Médias Diárias de 1962/1963 no Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba

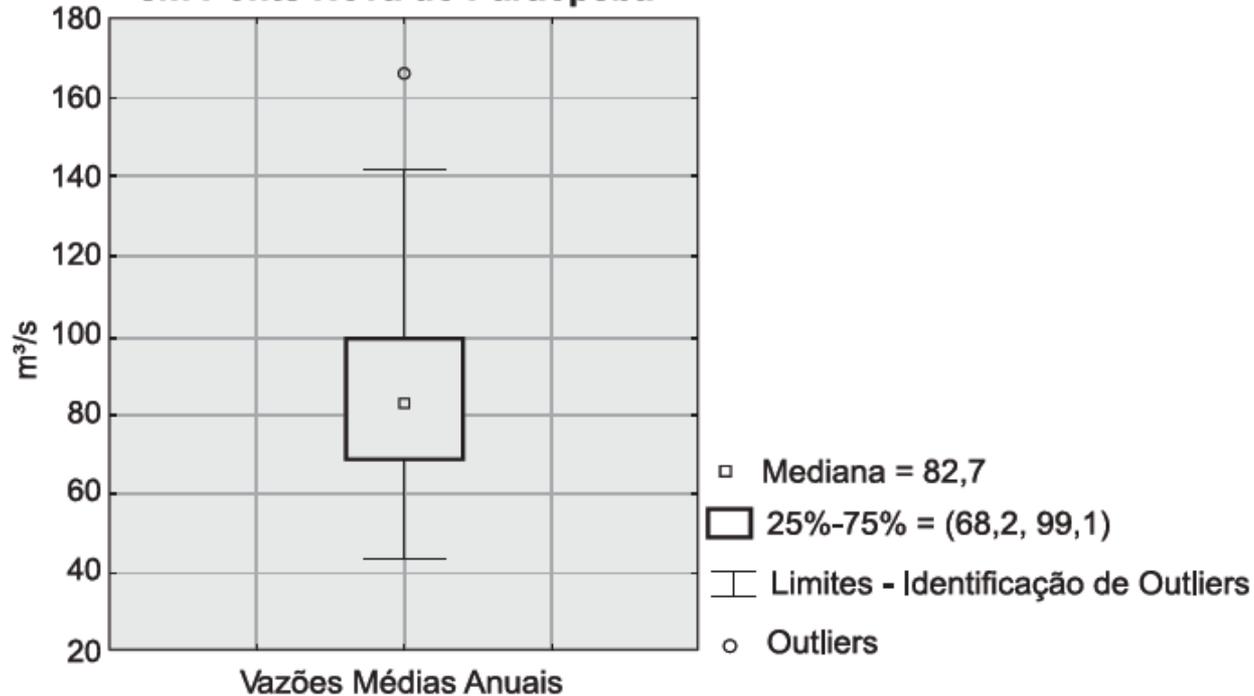


Curva de Permanência

- . incorpora a informação temporal
- . identifica eventos raros e comuns

Análise Exploratória

Box Plot - Vazões Médias Anuais do Rio Paraopeba em Ponte Nova do Paraopeba



Box Plot

- . descreve a forma da distribuição dos dados
- . ideal para verificar assimetria e presença de valores atípicos (*outliers*)
- . ignora as relações temporais e/ou espaciais dos pontos amostrados

Análise Exploratória 2D

Diagrama de Dispersão com Histogramas - Ponte Nova do Paraopeba

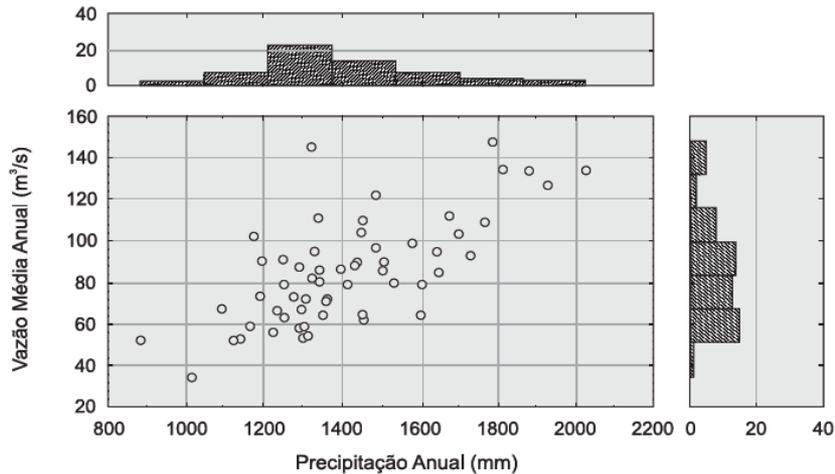


Diagrama de Dispersão com *Box Plots* - Ponte Nova do Paraopeba

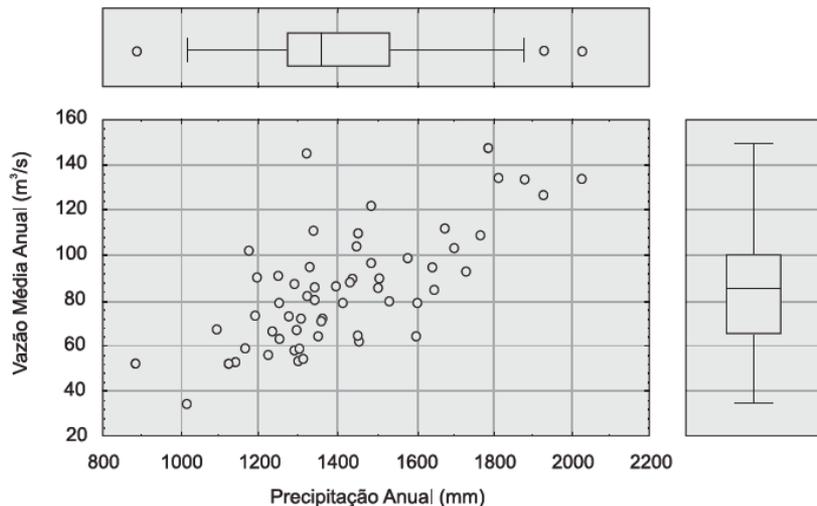


Diagrama de dispersão

- . avalia a relação entre 2 variáveis independentes (desconsidera a dependência temporal e espacial entre os pontos amostrados)
- . explicita natureza da relação (linear ou não linear)

Análise Exploratória 2D

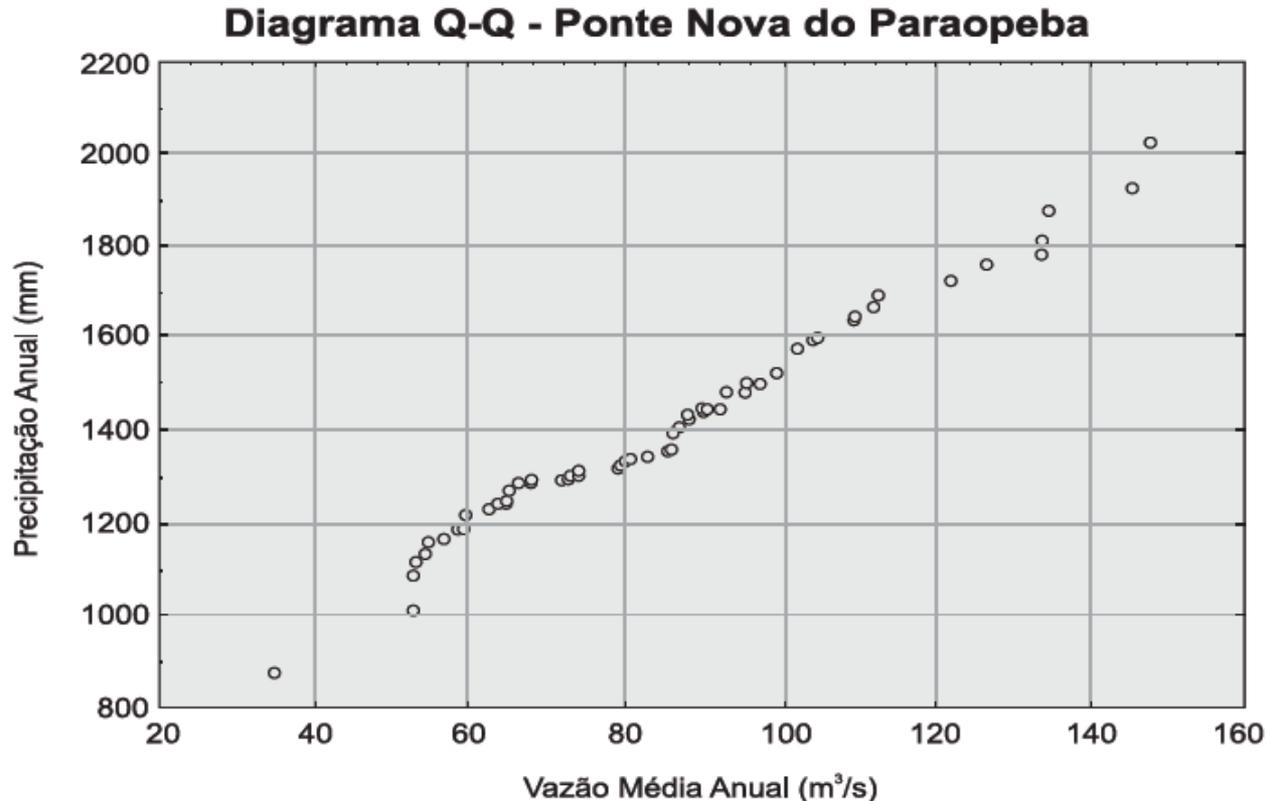


Diagrama Quantis-Quantis

- . relaciona dois conjuntos de dados ordenados
- . evidencia diferenças entre distribuições (sem considerar as escalas)
- . os pontos não representam observações simultâneas (tempo e espaço)

Erros em Séries Hidrológicas

Tipos de Erros:

- . pontuais ou isolados: falhas na leitura ou no arquivamento dos dados
- . sistemáticos: mudança do local da medição ou perda de calibração do aparelho

Métodos de Preenchimento de falhas:

- . Método da ponderação regional
- . Método da regressão linear

Exemplo: dados pluviométricos

Preenchimento de Falhas

Método da ponderação regional

Selecionam-se dados de pelo menos 3 postos mais próximos daquele em que ocorreu a falha, com características climáticas semelhantes e que possuam no mínimo 10 anos de dados.

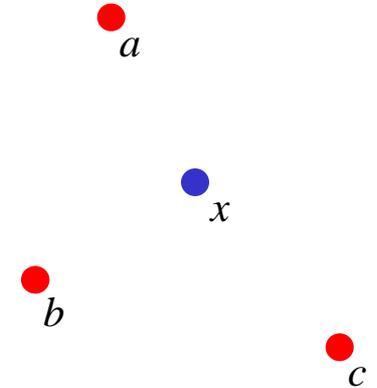
O valor de precipitação P_x (por exemplo) que se deseja determinar pode ser estimado por:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\frac{M_x}{M_a} P_a + \frac{M_x}{M_b} P_b + \frac{M_x}{M_c} P_c \right]$$

M_x é a precipitação média anual do posto x ;

M_a , M_b e M_c são as precipitações médias anuais dos postos vizinhos a x ;

P_a , P_b e P_c são as precipitações observadas no instante em que o posto x falhou.

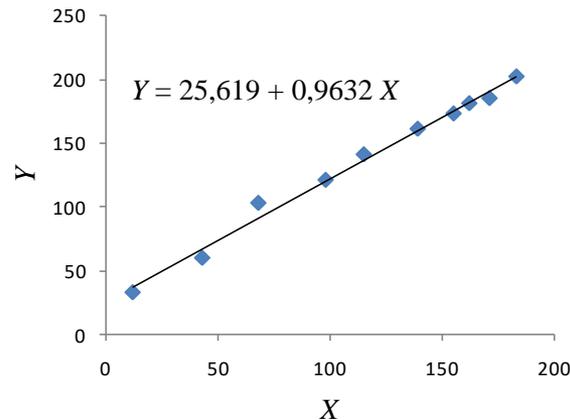


Preenchimento de Falhas

Método da regressão linear simples ou múltipla

Para o ajuste da regressão linear simples, correlaciona-se o posto com falhas (Y) com outro vizinho (X). Os parâmetros da equação de regressão podem ser estimados por mínimos quadrados. Uma vez definida a equação, as falhas podem ser preenchidas por $Y = a + bX$

Y	X
185	171
173	155
141	115
103	68
Y_a	51
Y_b	33
33	12
60	43
121	98
161	139
181	162
202	183



$$Y_a = 25,619 + 0,9632 * 51 = 74,7$$

$$Y_b = 25,619 + 0,9632 * 33 = 57,4$$

Na regressão linear múltipla, pode-se utilizar vários postos vizinhos: $Y = a + bX_1 + cX_2 + \dots$

Análise de Consistência

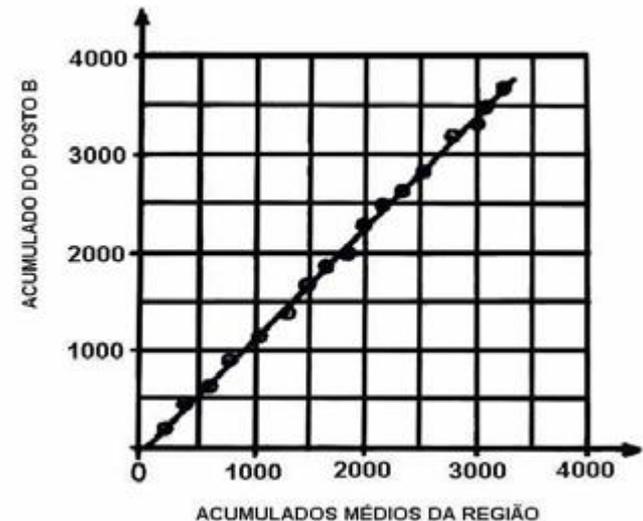
Esta análise é utilizada para verificar a presença de alguma anormalidade na estação pluviométrica analisada, tal como mudança de local ou das condições do aparelho ou modificação no método de observação

Método de Dupla Massa: plotagem das precipitações acumuladas do posto analisado (no eixo das ordenadas) contra a média dos valores acumulados da região (no eixo das abscissas)

Qualquer mudança de tendência indica inconsistência que pode variar de acordo com o problema

A plotagem é realizada para valores mensais e no sentido do passado para o presente

Caso alguma falha tenha sido preenchida e uma inconsistência constatada, as falhas devem ser re-estimadas



Análise de Consistência

Problema

Mudança na declividade da reta: determinada por duas ou mais retas (pelo menos 5 pontos consecutivos).

Constitui o exemplo típico da ocorrência de erros sistemáticos devido a mudança nas condições de observação ou no meio físico.

Os valores inconsistentes podem ser corrigidos por:

$$P_c = P_i + \frac{\beta_c}{\beta_e} (P_e - P_i)$$

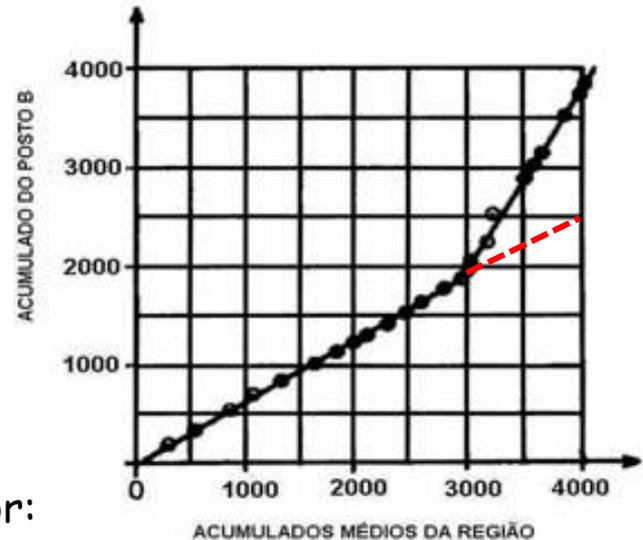
P_c - precipitação acumulada corrigida

P_i - valor da intersecção das duas retas

P_e - precipitação acumulada a ser corrigida

β_c - coeficiente angular da tendência corrigida

β_e - coeficiente angular da tendência incorreta

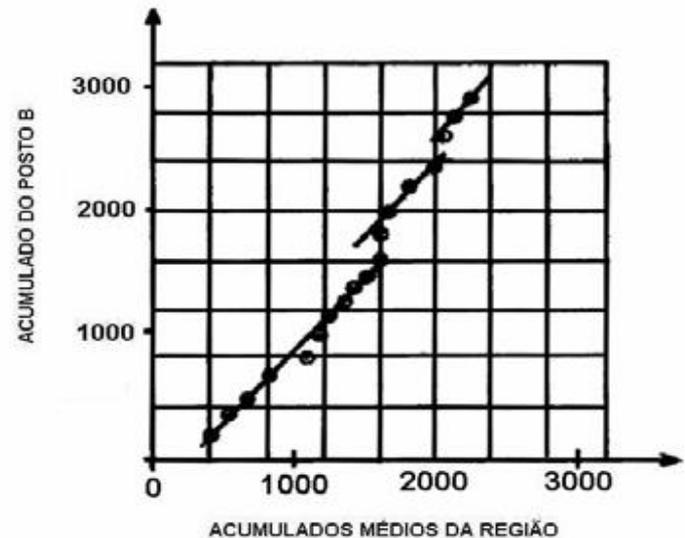


Análise de Consistência

Problema

Alinhamento dos pontos em retas paralelas:

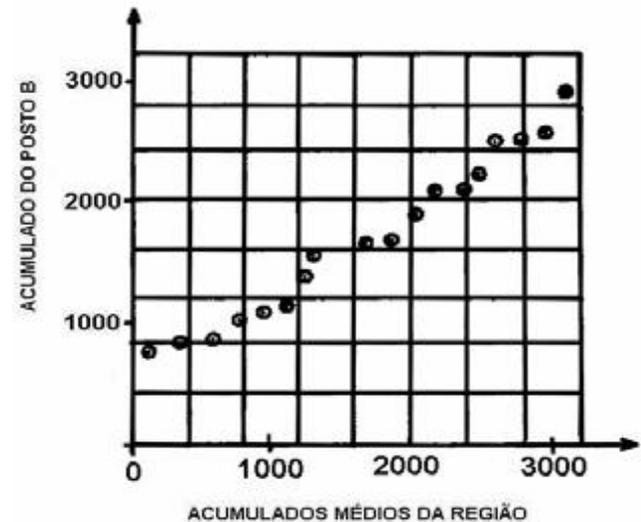
ocorre quando existem erros de transcrição de um ou mais dados ou pela presença de valores extremos em uma das séries plotadas



Análise de Consistência

Problema

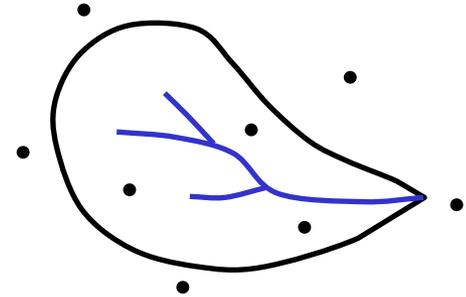
Distribuição errática dos pontos: geralmente é resultado da comparação de postos com diferentes regimes pluviométricos, sendo incorreta toda associação que se deseje fazer entre os dados dos postos plotados



Espacialização/Interpolação de dados

Objetivos:

- Obter uma representação contínua no espaço do fenômeno a partir de algumas observações pontuais
- Estimar valores para pontos sem informação a partir de seus "vizinhos"
- Estimar o valor médio representativo para a bacia hidrográfica

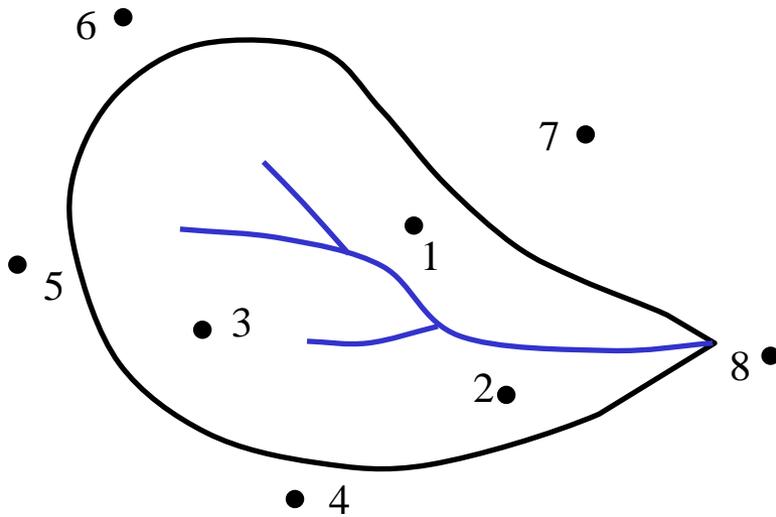


Técnicas:

- Médias aritmética e ponderadas
- Polígonos de Thiessen
- Isoietas
- Geoestatística (krigeagem)

Espacialização/Interpolação de dados

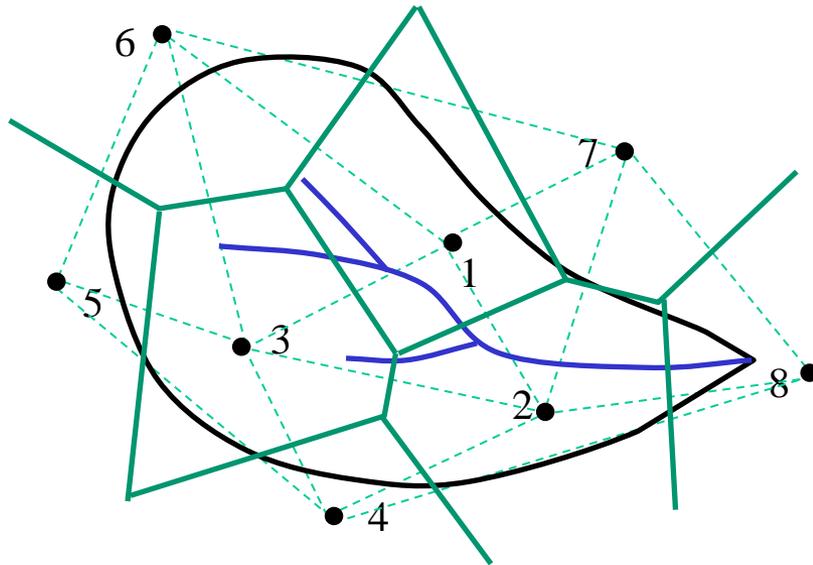
Cálculo da precipitação média da bacia hidrográfica



$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad \text{Média simples}$$

Espacialização/Interpolação de dados

Cálculo da precipitação média da bacia hidrográfica



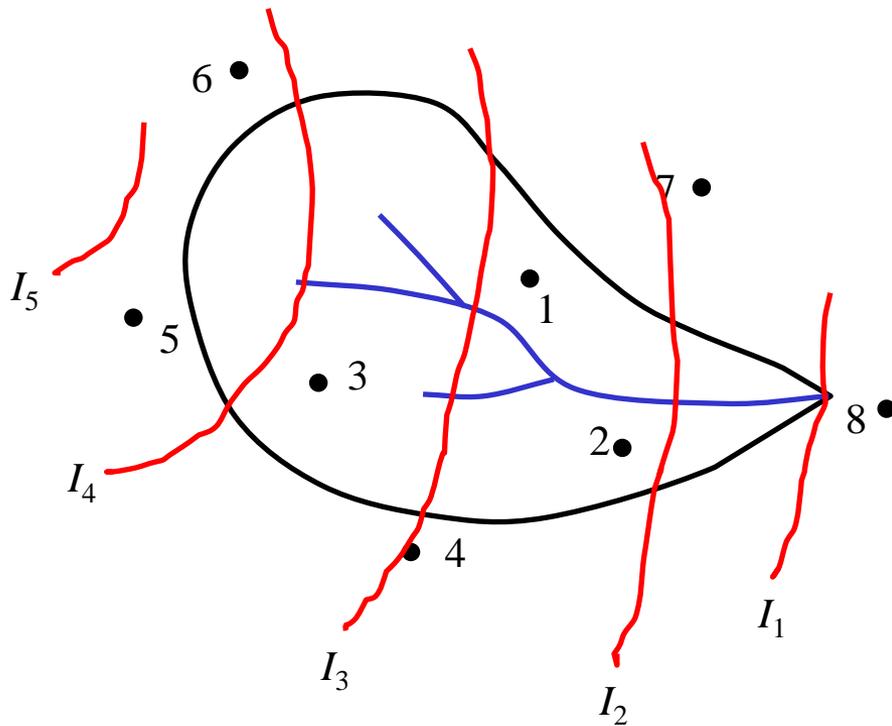
Polígonos de Thiessen
(vizinho mais próximo)

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{Média ponderada}$$

A_i é a área de intersecção entre cada polígono Thiessen e a bacia hidrográfica

Espacialização/Interpolação de dados

Cálculo da precipitação média da bacia hidrográfica

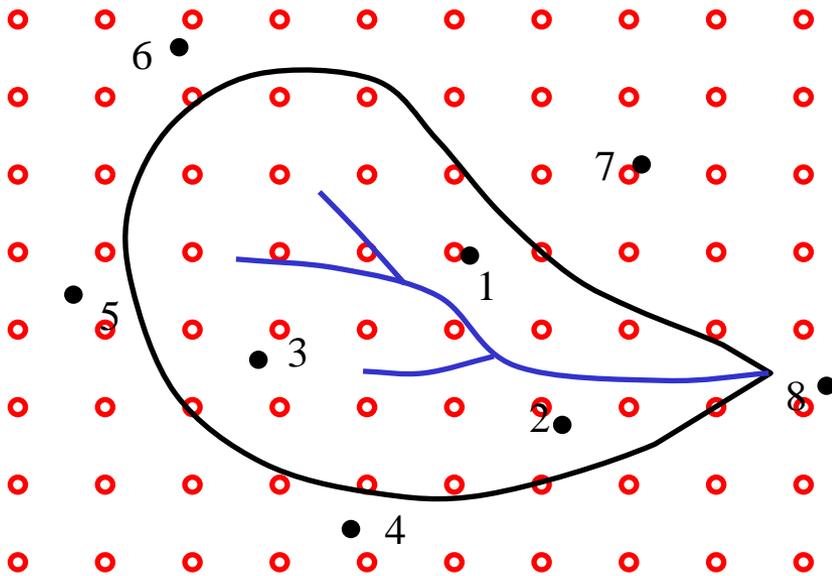


$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{I_i + I_{i+1}}{2} A_i}{\sum_{i=1}^m A_i} \quad \text{Média ponderada}$$

A_i é a área de intersecção entre cada par de isolinhas consecutivas e a bacia hidrográfica

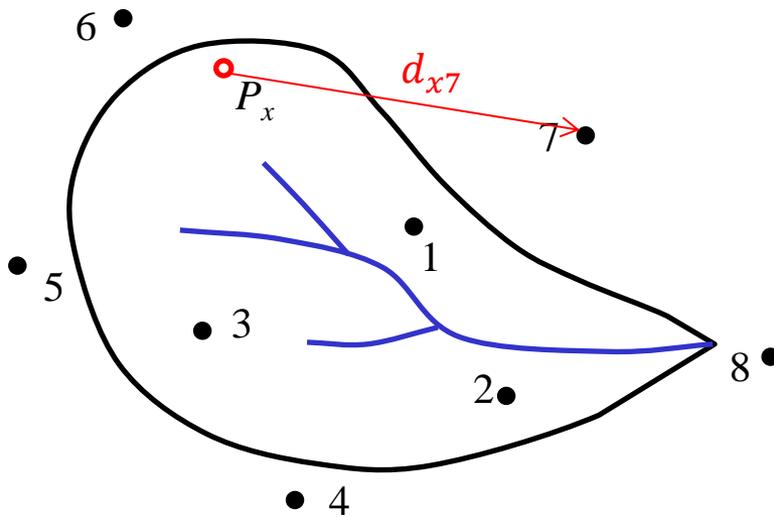
Espacialização/Interpolação de dados

Espacialização usando ponderações baseadas em distância...



Espacialização/Interpolação de dados

Espacialização usando ponderações baseadas em distância...



$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{d_{xi}^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{xi}^k}}$$

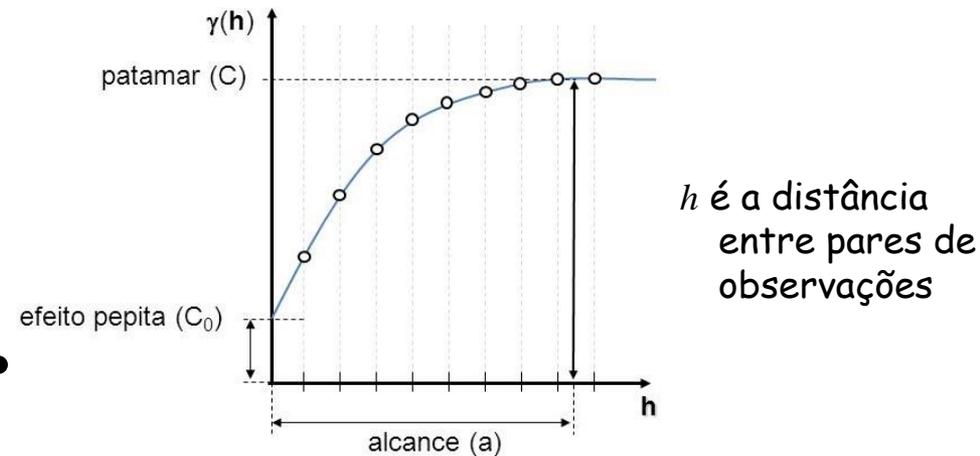
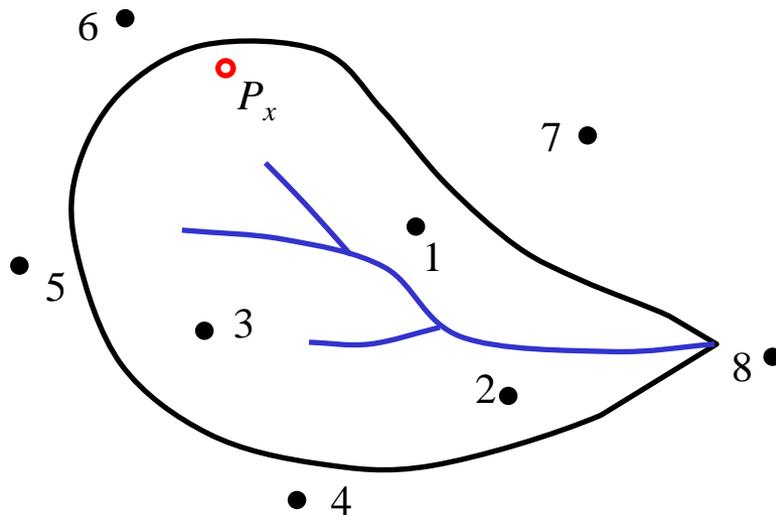
d_{xi} é a distância entre o ponto x e a estação i

k é o expoente (peso) da ponderação

Se $k = 2$, a ponderação é conhecida como o inverso do quadrado da distância

Espacialização/Interpolação de dados

Espacialização usando geoestatística (krigeagem)...



Semivariograma

$$P_x = \sum_{i=1}^n \lambda_i P_i$$

λ_i é peso estimado para estação i

Dificuldades:

- Encontrar o semivariograma representativo
- Requer grande número de estações
- Não considera séries temporais (um semivariograma para cada tempo t)