



Direção-Geral de Agricultura
e Desenvolvimento Rural

6 de Abril 2018



DECIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL, ARQUITETURA E GEORRECURSOS
TÉCNICO LISBOA

CERIS

Civil Engineering Research
and Innovation for
Sustainability

Análise da frequência de acontecimentos hidrológicos extremos em Portugal Continental

- modelação não-paramétrica de valores extremos de precipitação e
de caudal -

Maria Manuela Portela

Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa (UL), CERIS, Investigação e Inovação em
Engenharia Civil para a Sustentabilidade, Portugal

Análise da frequência de acontecimentos hidrológicos extremos em Portugal Continental

– modelação não-paramétrica de valores extremos de precipitação e de caudal –

1. Enquadramento

2. Modelos

Séries de duração parcial, SDP

Frequência dos acontecimentos extremos

3. Casos de estudo

4. Resultados

5. Conclusões



Direção-Geral de Agricultura
e Desenvolvimento Rural

6 de Abril 2018



DECIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL, ARQUITETURA E GEORRECURSOS
TÉCNICO LISBOA

CERIS : Civil Engineering Research
and Innovation for
Sustainability

1. Enquadramento

- ✓ Muito frequentemente pretende-se, através de estudos hidrológicos, designadamente, de índole estatística, inferir sobre **valores futuros de uma dada variável hidrológica a partir da análise de amostras dessa variável.**
- ✓ Para tanto, é fundamental assegurar que a amostra é:
 - **representativa** da população de onde provém (em termos, obviamente, de características médias, mas, muito pertinentemente, da variabilidade intrínseca do fenómeno a que se refere e dos seus valores extremos ... relevância da dimensão da amostra).
 - **estacionária** ou seja, **consistente** (sem alteração do erro sistemático de medição da grandeza ➡ fundamental a “estabilidade” e a “continuidade” da rede de medição) e **homogénea** (sem alteração nos fatores que condicionam o fenómeno a que se refere ➡ futuro será estatisticamente igual ao passado).

- ✓ Historicamente, o pressuposto de **estacionaridade** (na ótica da homogeneidade) de variáveis hidrológicas é uma **hipótese de base** adotada nas abordagens envolvendo recursos hídricos (análise, modelação, planeamento, gestão,).
- ✓ Contudo, tem vindo a ser posto em causa em virtude das consequências atribuíveis às **mudanças climáticas**.

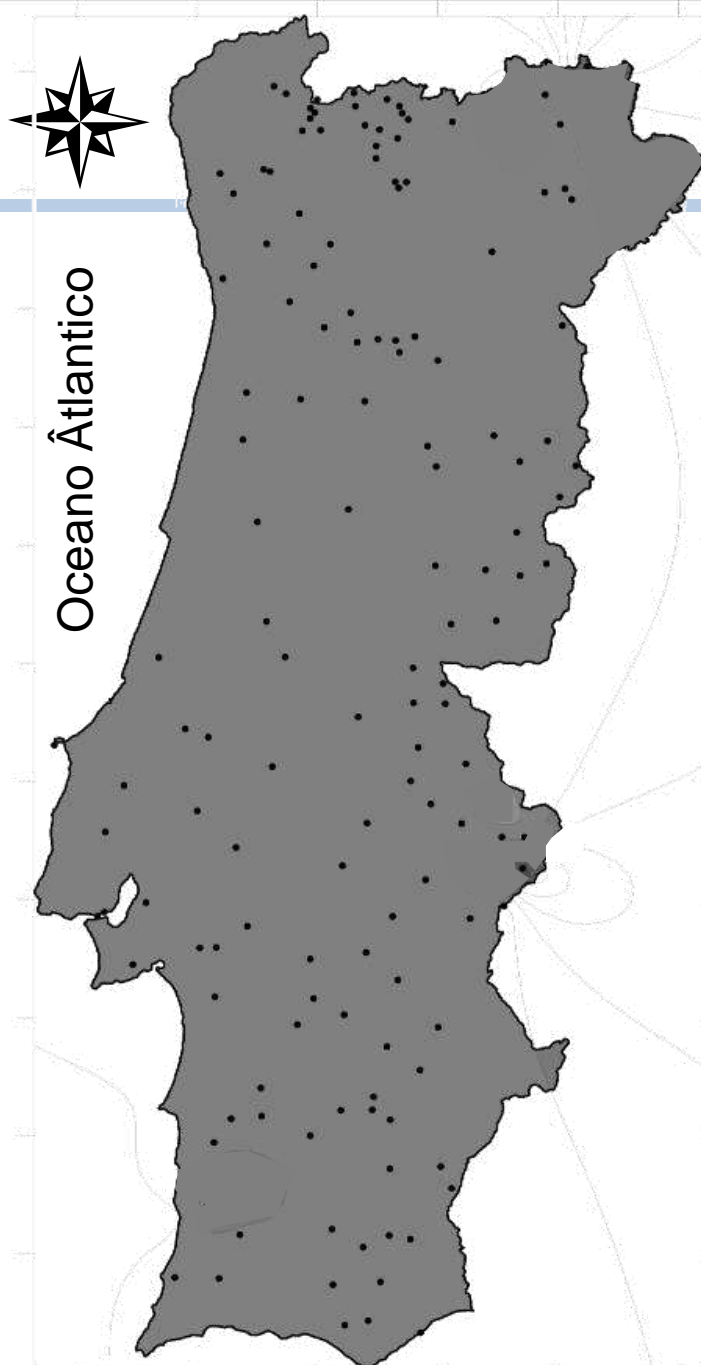
A mudança climática configura uma quebra de estacionaridade/homogeneidade

- ✓ Vários investigadores argumentam que urge, assim, aumentar o conhecimento sobre os processos inerentes à **variabilidade climática** e às **mudanças climáticas**, para compreender e antever a sua evolução num contexto **não estacionário**, bem como as consequências que daí advêm, nomeadamente na **ocorrência e nas características de acontecimentos hidrológicos extremos**.

A mudança climática configura uma quebra de estacionaridade/homogeneidade

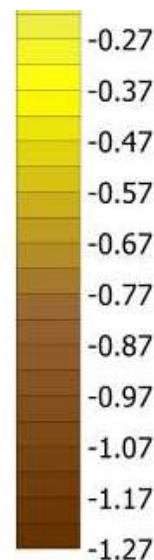
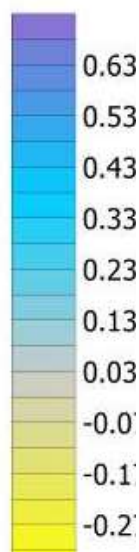
Em termos de investigação:

- ✓ Modelos de circulação gearal da atmosfera (***General Circulation Models***, GCMs) aplicados a cenários.
- ✓ Modelos destinados à **deteção de tendências** com o objetivo de identificar **variações consistentemente crescentes/decrescentes e estatisticamente significativas** nos valores das variáveis hidrológicas (... têm de “estar para além” da variabilidade natural dos fenómenos a que tais variáveis respeitam).



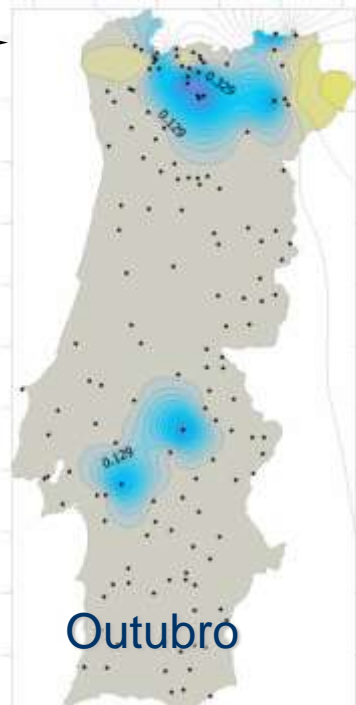
Deteção de tendências em séries anuais e mensais de precipitação (magnitude) tendo por base o teste de Mann-Kendall combinado com estimador de declive de Sen aplicados a 94 anos de precipitações anuais e mensais (1910/11 – 2003/04) em 144 postos udométricos de Portugal Continental

aumento

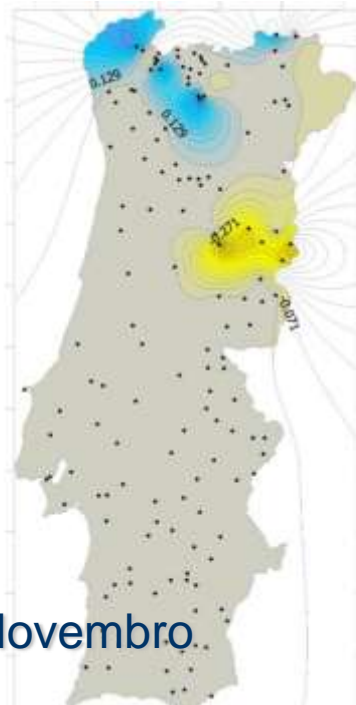


diminuição

... para cada intervalo de tempo: variação da precipitação expressa em percentagem da precipitação média nesse intervalo de tempo (% por ano)



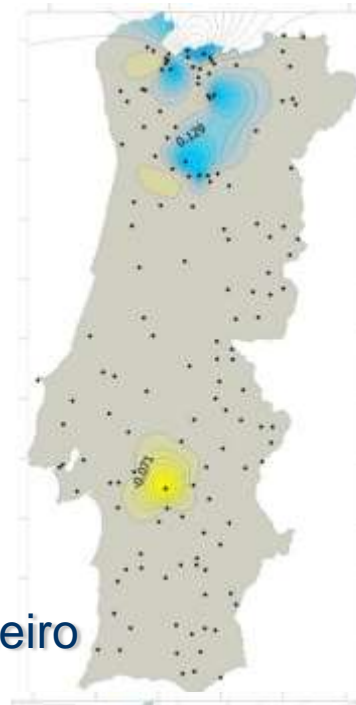
Outubro



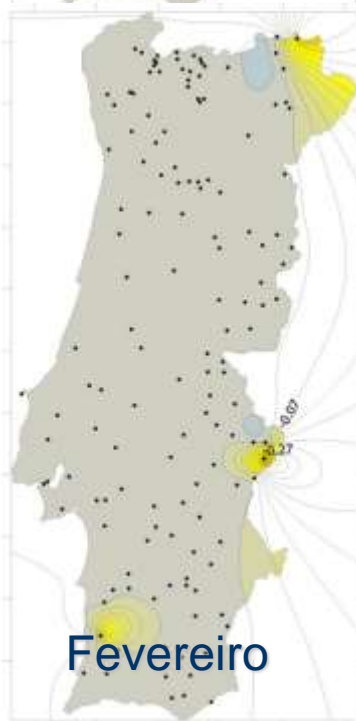
Novembro



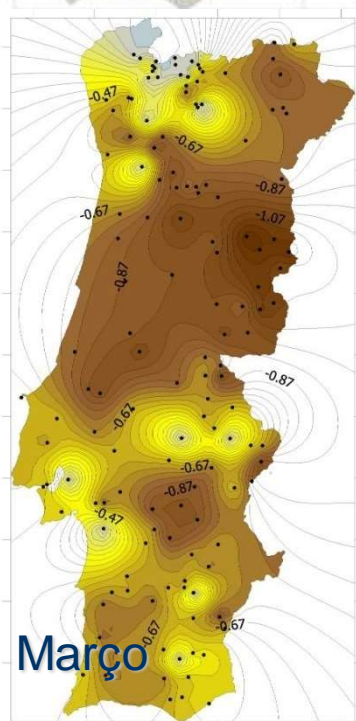
Dezembro



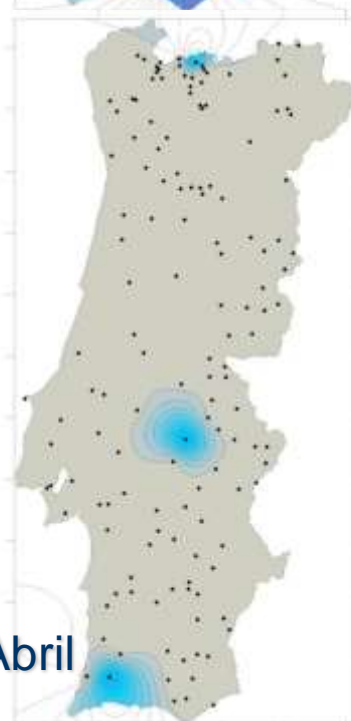
Janeiro



Fevereiro



Março



Abril



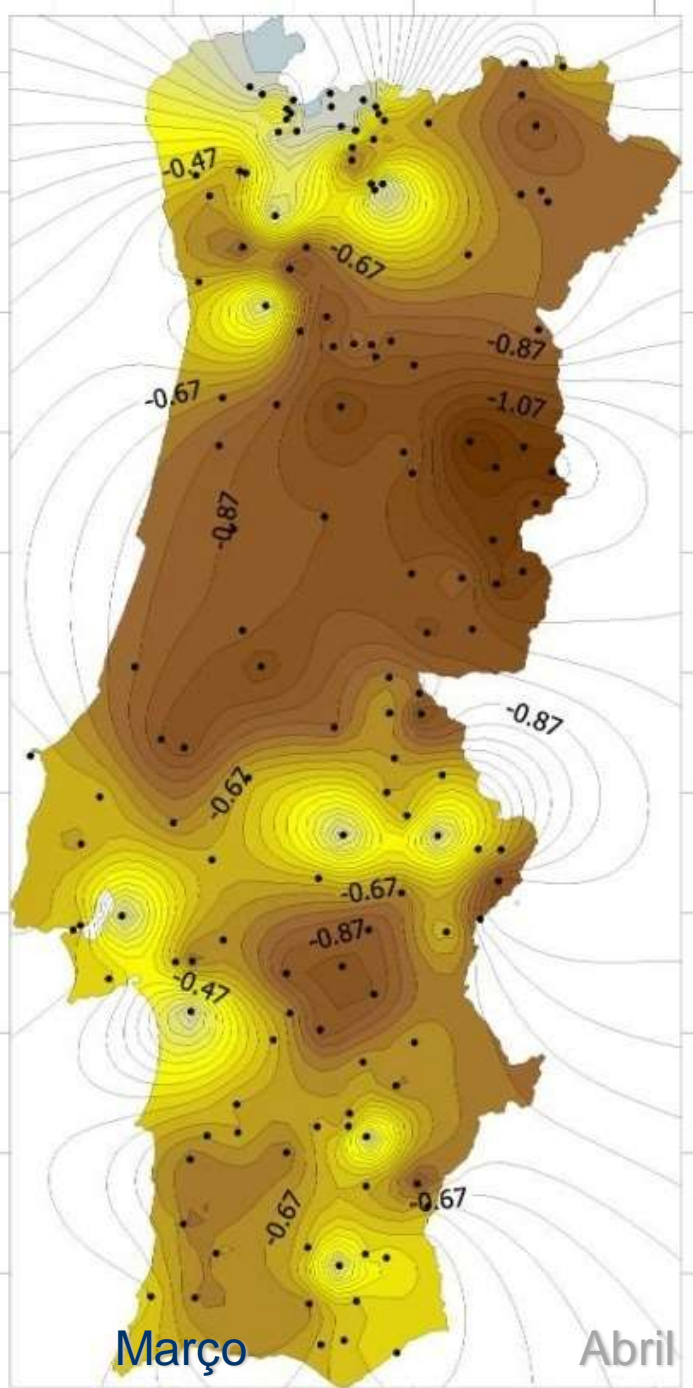
Maio



Outubro

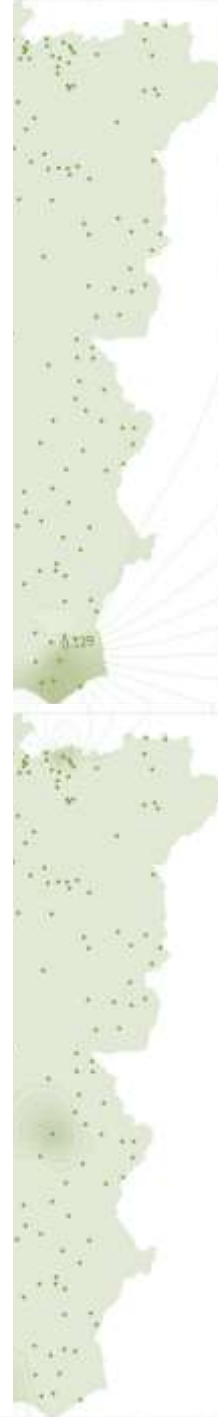


Fevereiro



Março

Abril

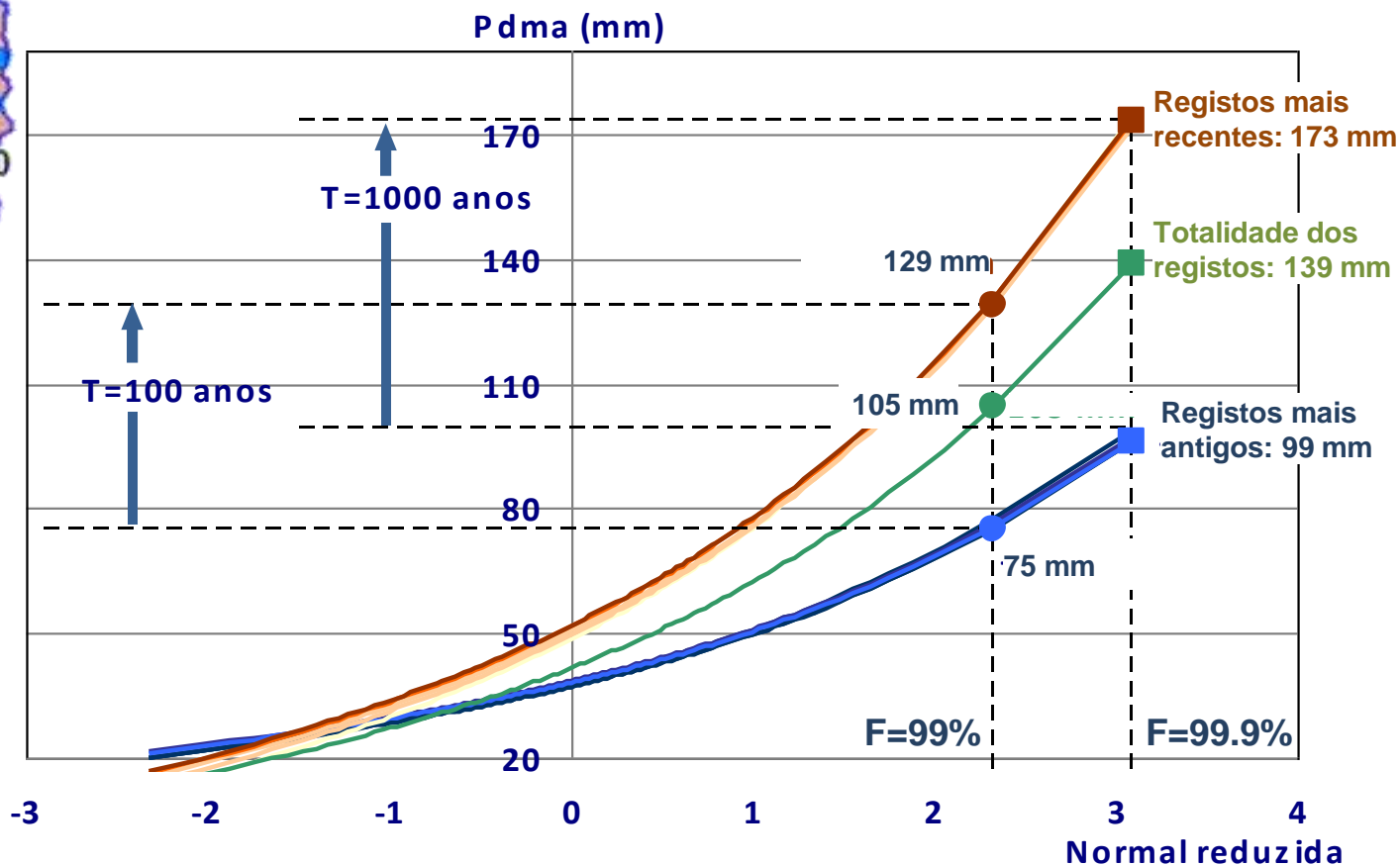
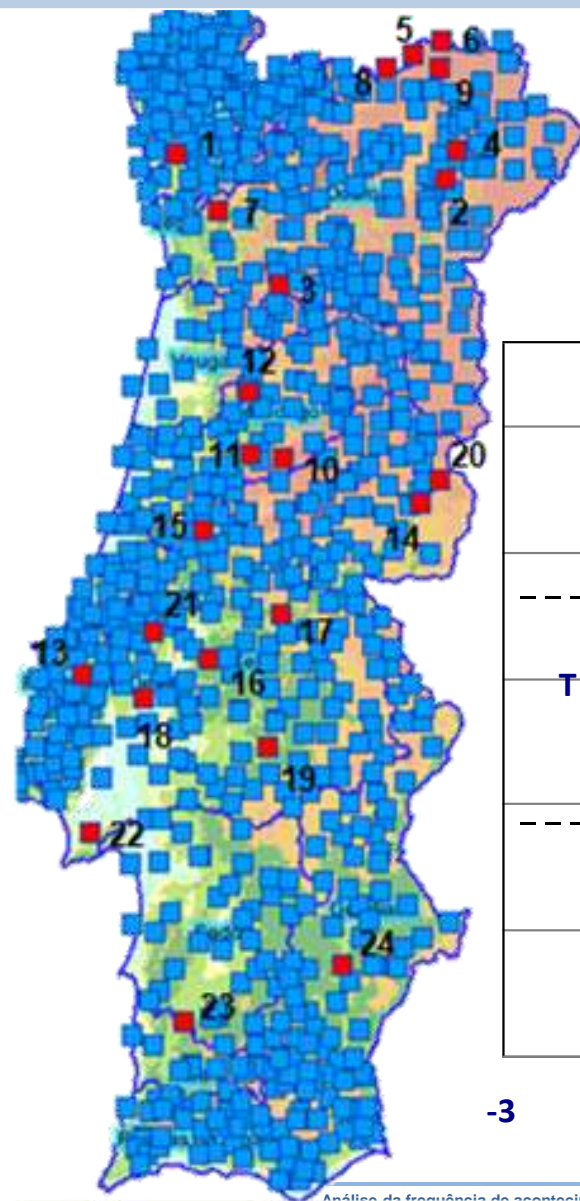


Janeiro



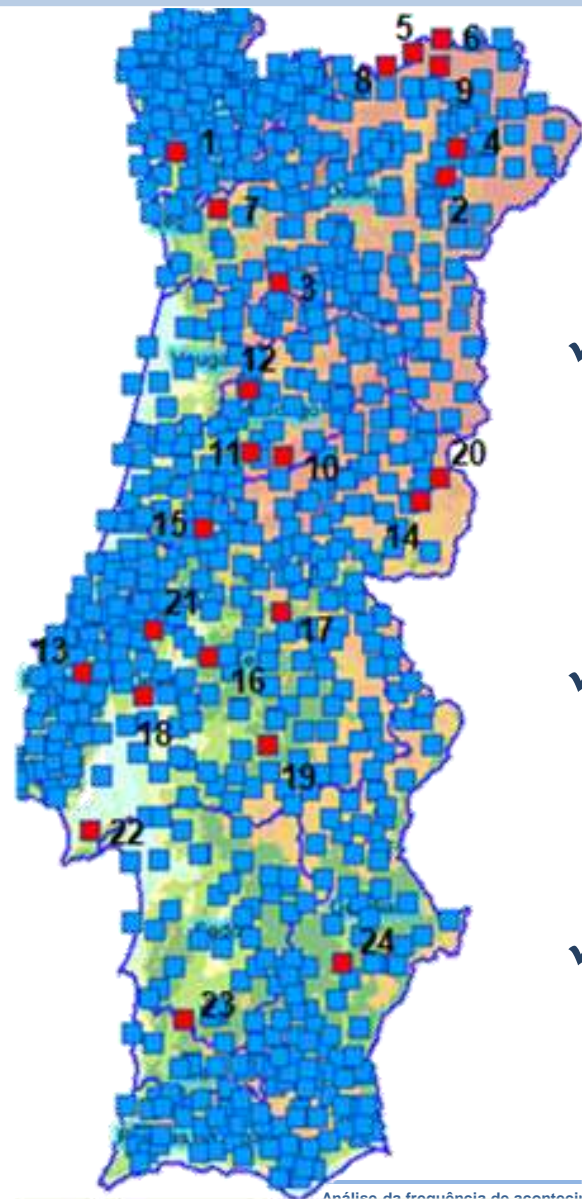
Maio

Análise de precipitações intensas baseada na análise estatística de 24 amostras de precipitações diárias máximas anuais, Pdma



Análise de precipitações intensas baseada na análise estatística de 24 amostras de precipitações diárias máximas anuais, Pdma

- ✓ Para alguns postos (Vinhais, norte) as estimativas baseadas nos **registos mais recentes são inferiores** às fornecidas pelos registos mais antigos, sendo que noutros postos (Serpa, sul) a situação é **oposta**, existindo ainda postos (Pernes, centro) para os quais tais estimativas **são muito próximas**.
- ✓ O comportamento das precipitações intensas pode **infirmar** ou **confirmar** a tendência de aumento da magnitude daquelas precipitações que é geralmente apontada como sendo consequência do efeito da mudança climática.
- ✓ Em termos de projeto, é fundamental **analisar diferentes períodos de registos** de modo a garantir **valores de conservativos** (a amostra global não obstante a sua maior dimensão poderá não ser a opção mais correta!)



Objetivo

Independentemente de eventuais variações de valor/magnitude, averiguar se a frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos denota alterações (acontecimentos progressivamente mais frequentes ou não), por forma a:

- (1) Averiguar se o pressuposto de estacionaridade, subjacente na maior parte dos modelos hidrológicos permanece aplicável.**
- (2) Estabelecer modelos bivariados que façam depender as estimativas de valores das variáveis hidrológicas das respetivas frequências.**
- (3) Pesquisar dependências com descritores do clima/índices de teleconexão, interpretando-as à luz dos efeitos esperados das mudanças climáticas.**

Objetivo

Independentemente de eventuais variações de valor/magnitude, averiguar se a **... frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos ...** (acontecimentos progressivamente mais frequentes ou não), por forma a:

- (1) **Averiguar se o pressuposto de estacionaridade permanece aplicável.**
- (2) Estabelecer modelos bivariados que façam depender as estimativas de valores das variáveis hidrológicas das respetivas frequências.
- (3) Pesquisar dependências com descritores do clima/índices de teleconexão, interpretando-as à luz dos efeitos esperados das mudanças climáticas.



Direção-Geral de Agricultura
e Desenvolvimento Rural

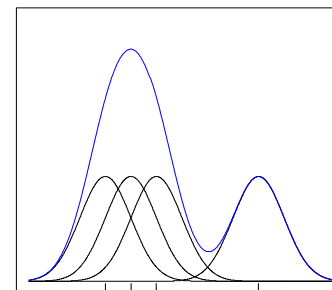
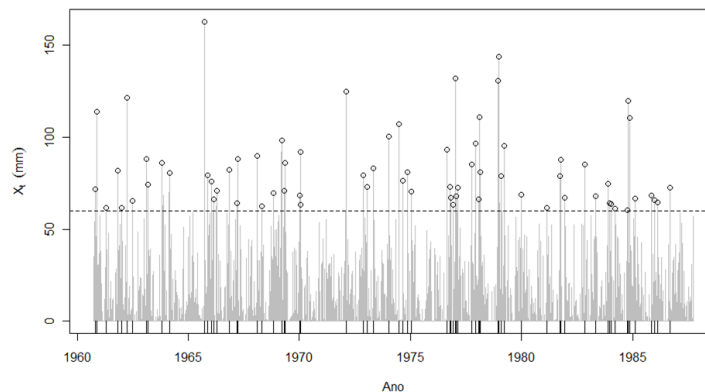
6 de Abril 2018



DECIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL, ARQUITETURA E GEORRECURSOS
TÉCNICO LISBOA

CERIS : Civil Engineering Research
and Innovation for
Sustainability

2. Modelos. Séries de duração parcial, SDP. Frequência dos acontecimentos extremos



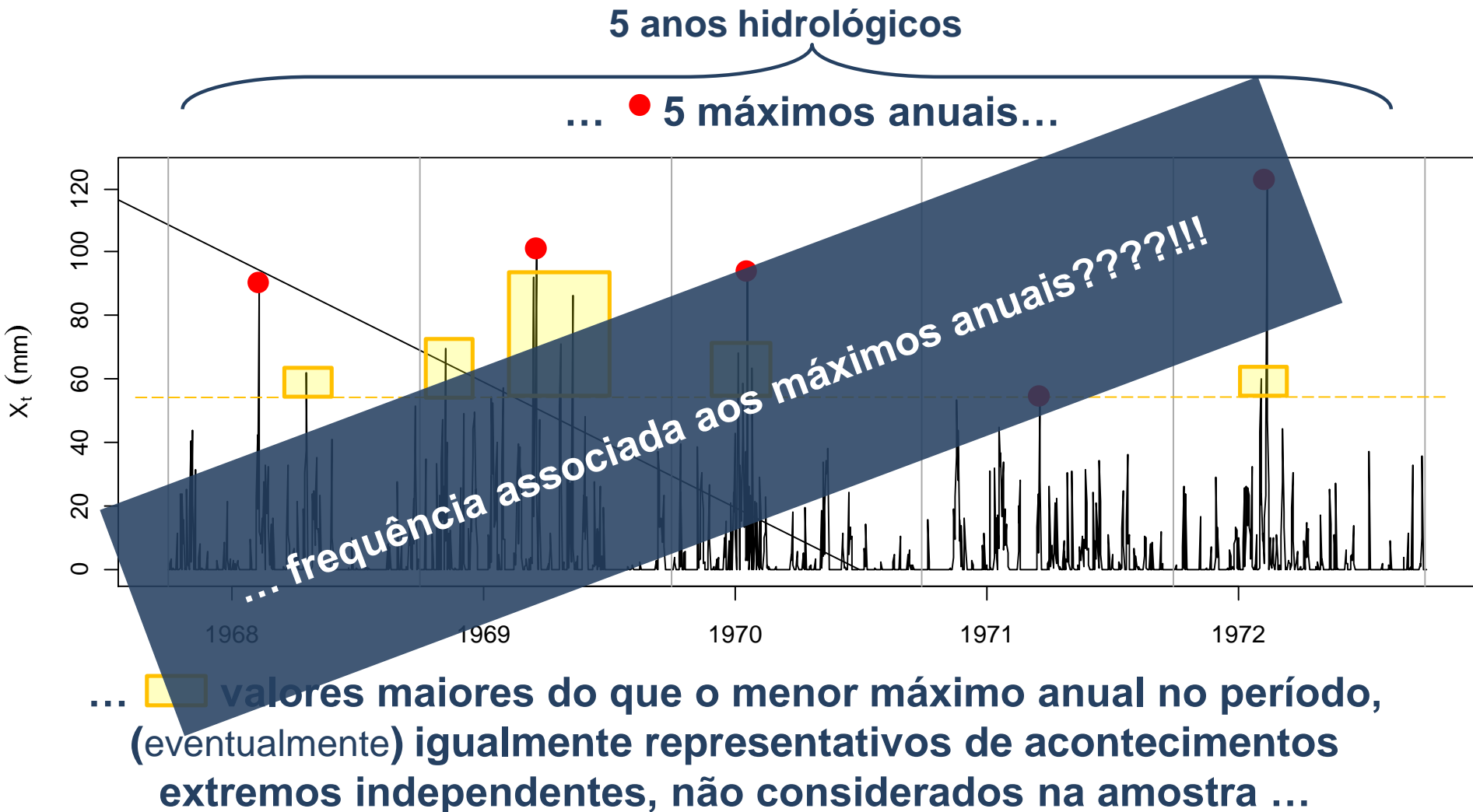
- ✓ O estudo da **frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos** requer abordagens específicas que não são obviamente compatíveis com as amostras comumente utilizadas **de máximos anuais (SMA/AMS, séries de máximos anuais/annual maximum series)** um evento por ano, para já não falar da frequente falta de representatividade/dimensão insuficiente dessas amostras!

- ✓ O estudo da **frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos** requer abordagens específicas que não são obviamente compatíveis com as amostras comumente utilizadas **de máximos anuais (SMA/AMS, séries de máximos anuais/annual maximum series)** um evento por ano, para já não falar da frequente falta de representatividade/dimensão insuficiente dessas amostras!
- ✓ Para amostrar os acontecimentos hidrológicos extremos, designadamente **precipitações intensas e caudais de cheia**, no que respeita à sua frequência (...e modelação bivariada) **recorreu-se à técnica das séries de duração parcial, SDP** (na nomenclatura inglesa ***partial duration series, PDS***, ou ***peaks over thresholds series, POT***) aplicada a registos diários.

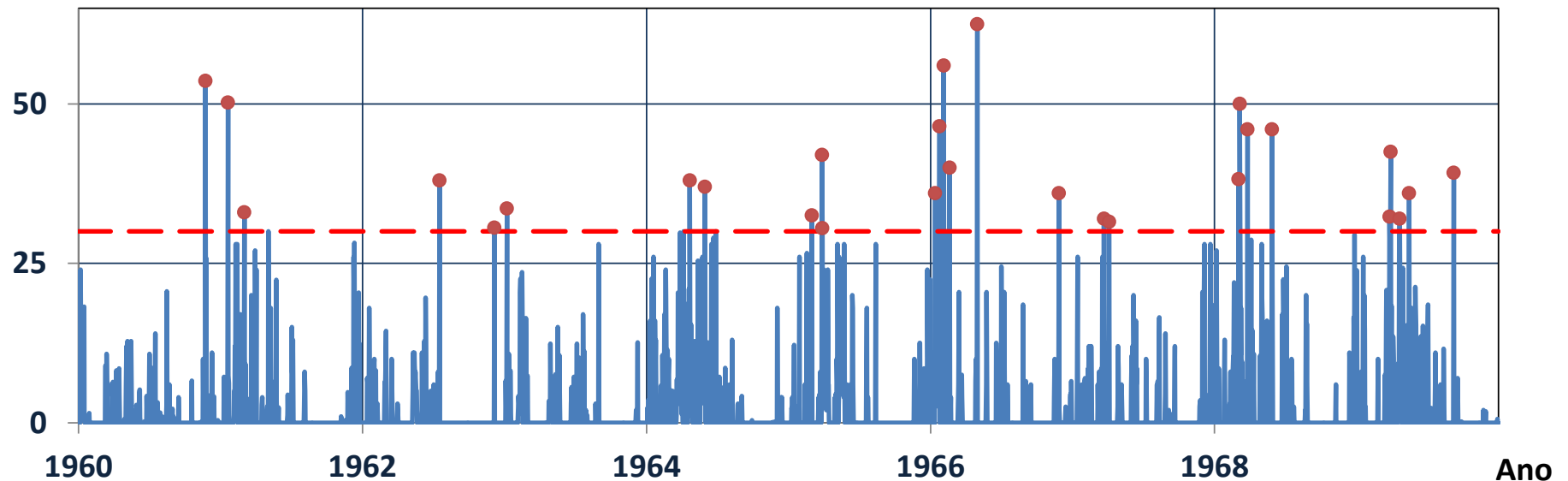
- ✓ O estudo da **frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos** requer abordagens específicas que não são obviamente compatíveis com as amostras comumente utilizadas **de máximos anuais (SMA/AMS, séries de máximos anuais/annual maximum series)** um evento por ano, para já não falar da frequente falta de representatividade/dimensão insuficiente dessas amostras!
- ✓ Para amostrar os acontecimentos hidrológicos extremos, designadamente **precipitações intensas e caudais de cheia**, no que respeita à sua frequência (...e modelação bivariada) **recorreu-se à técnica das séries de duração parcial, SDP** (na nomenclatura inglesa *partial duration series, PDS*, ou *peaks over thresholds series, POT*) aplicada a registos diários.
- ✓ Não obstante a sua maior **complexidade** e, mesmo, **subjetividade**, a técnica das **SDP** permite uma caracterização dos acontecimentos hidrológicos extremos mais **abrangente e representativa**.

- ✓ O estudo da **frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos** requer abordagens específicas que não são obviamente compatíveis com as amostras comumente utilizadas **de máximos anuais (SMA/AMS, séries de máximos anuais/annual maximum series)** um evento por ano, para já não falar da frequente falta de representatividade/dimensão insuficiente dessas amostras!
- ✓ Para amostrar os acontecimentos hidrológicos extremos, designadamente **precipitações intensas e caudais de cheia**, no que respeita à sua frequência (...e modelação bivariada) **recorreu-se à técnica das séries de duração parcial, SDP** (na nomenclatura inglesa *partial duration series, PDS*, ou *peaks over thresholds series, POT*) aplicada a registos diários.
- ✓ Não obstante a sua maior **complexidade** e, mesmo, **subjatividade**, a técnica das **SDP** permite uma caracterização dos acontecimentos hidrológicos extremos mais **abrangente e representativa**.
- ✓ **Houve que detalhar e generalizar o procedimento de amostragem por SDP!**

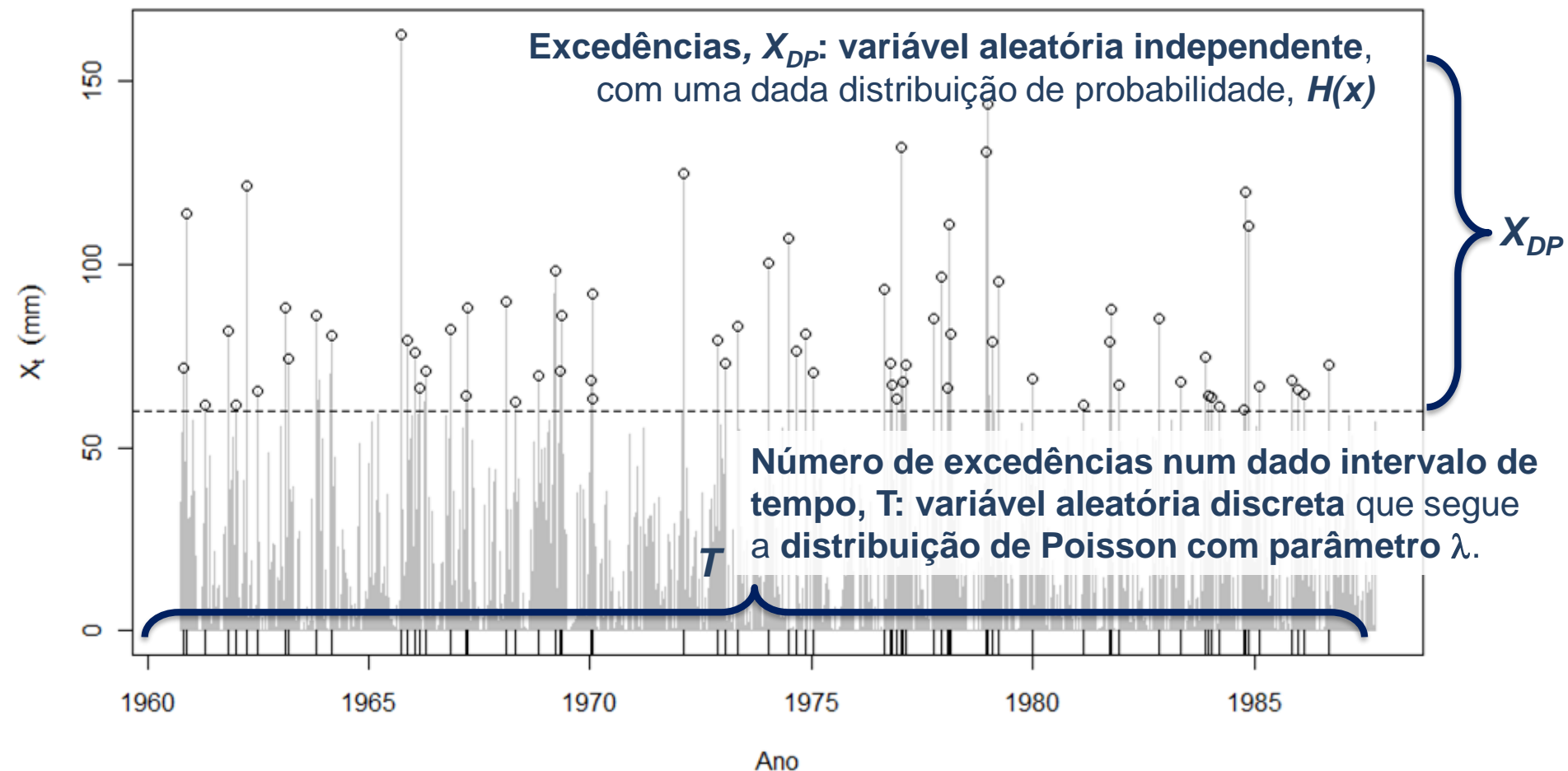
Séries de máximos anuais



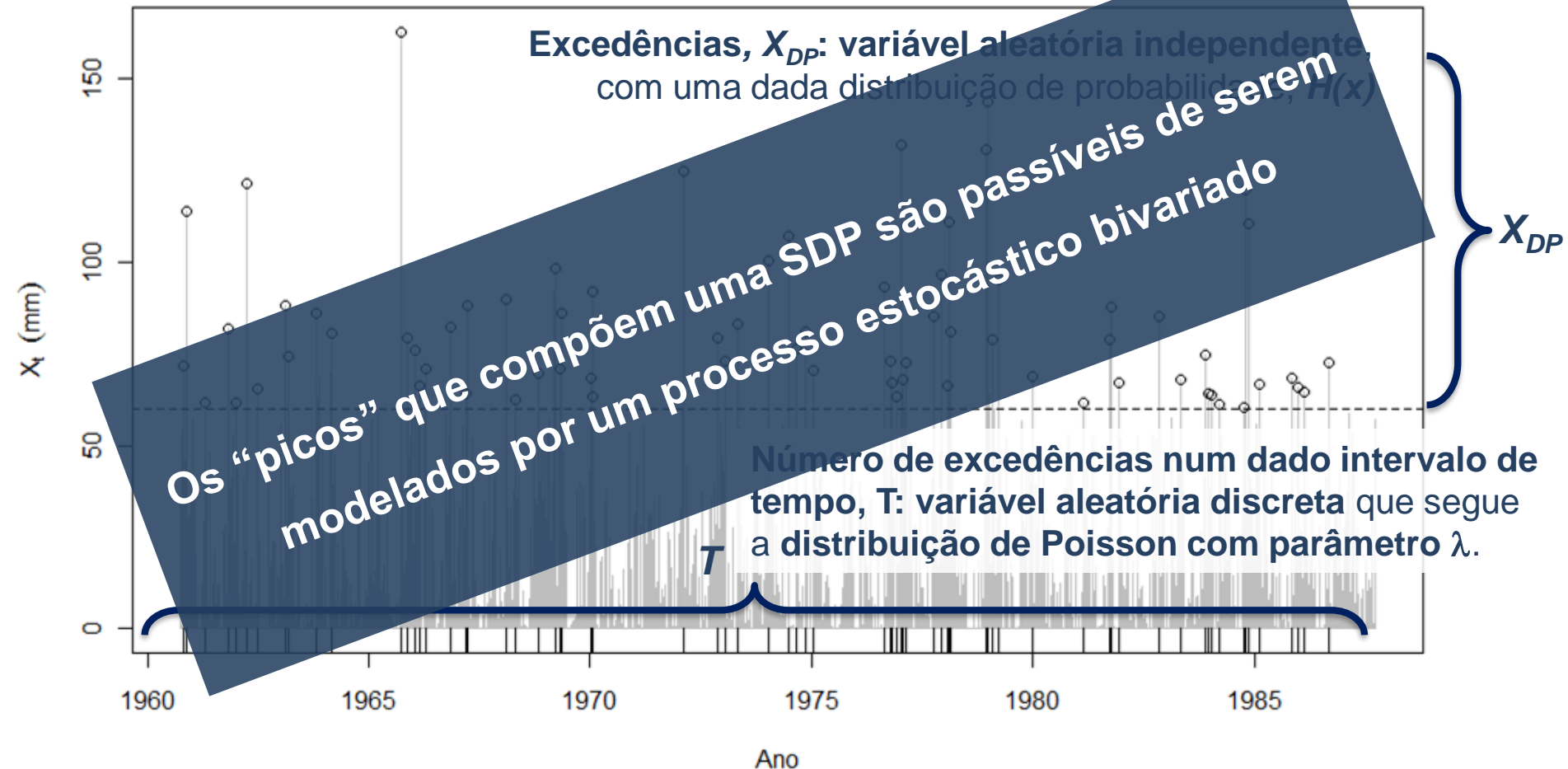
Séries de duração parcial (SDP): constituídas pelos “picos” que excedem um determinado valor **limiar** ou **threshold**, desde que tais picos consubstanciem **acontecimentos independentes** e se verifiquem **dadas condições**.

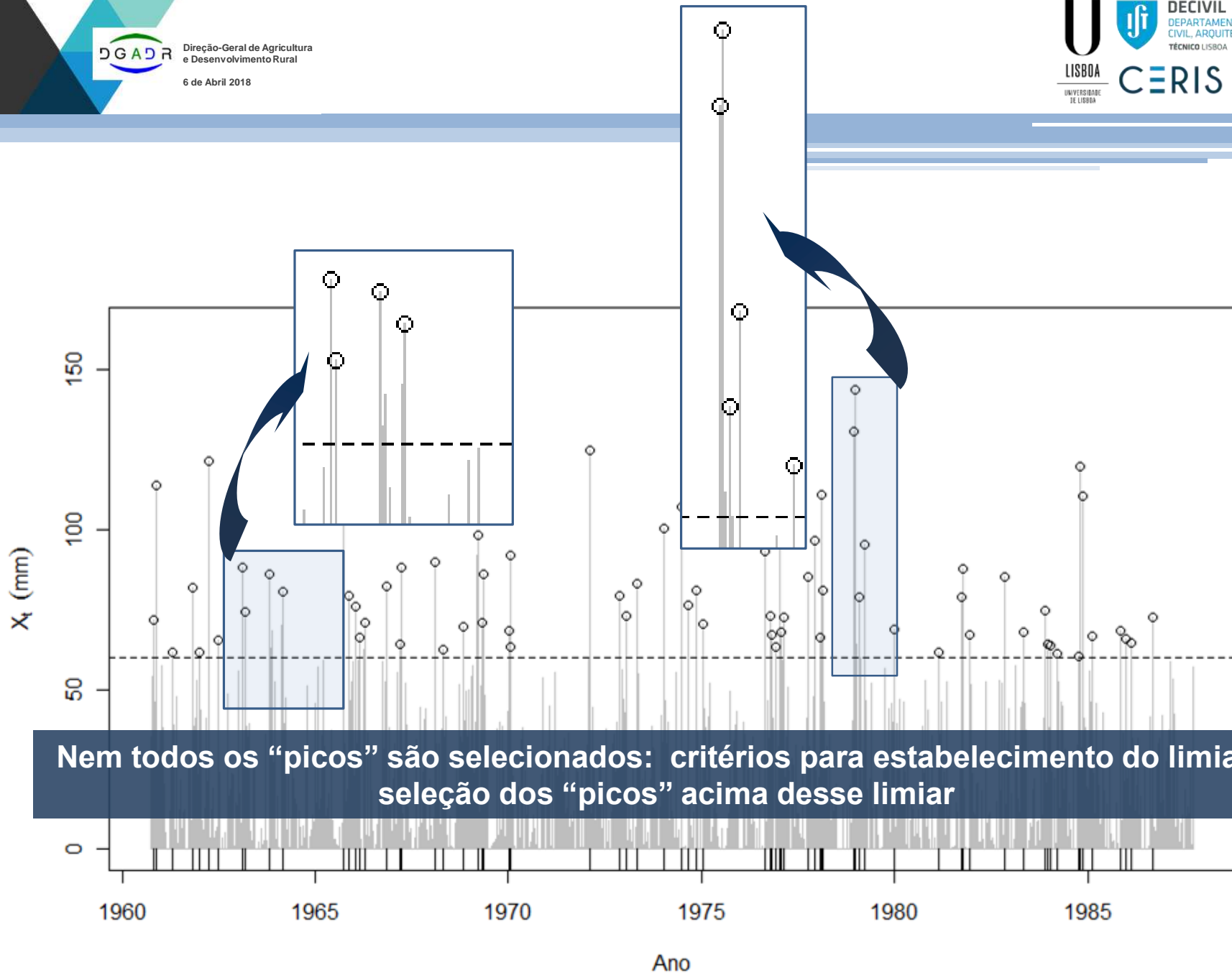


Formalmente, da amostragem por séries de duração parcial resultam
dois tipos de variáveis:



Formalmente, da amostragem por séries de duração parcial resultam
dois tipos de variáveis:

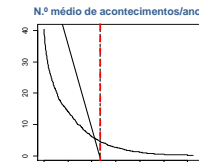




Nem todos os “picos” são selecionados: critérios para estabelecimento do limiar e seleção dos “picos” acima desse limiar

Na aplicação das SDP é fundamental a seleção do limiar / *threshold* para garantir a independência serial dos acontecimentos e a validade da hipótese de Poisson

1. Controlo do número médio de excedências por ano: $\lambda > 2$ a 3

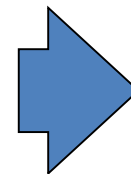
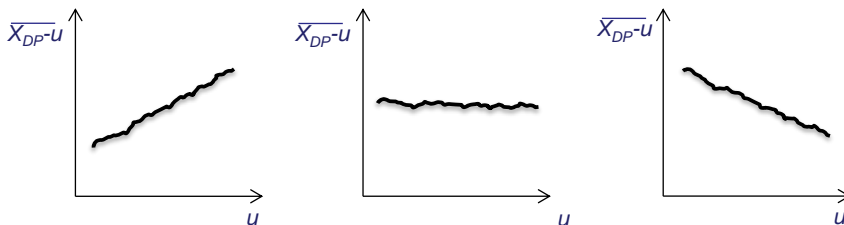


2. **Validação da hipótese de Poisson:** estatística de Fisher, ou índice de dispersão ID, aplicada ao número de excedências por ano, $\{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\}$ (... média e desvio padrão dados λ e S_m)

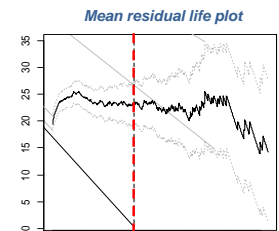
$$ID = \frac{S_m^2}{\lambda} \in \left[\frac{\chi_{\alpha/2, M-1}^2}{M-1}, \frac{\chi_{1-\alpha/2, M-1}^2}{M-1} \right]$$



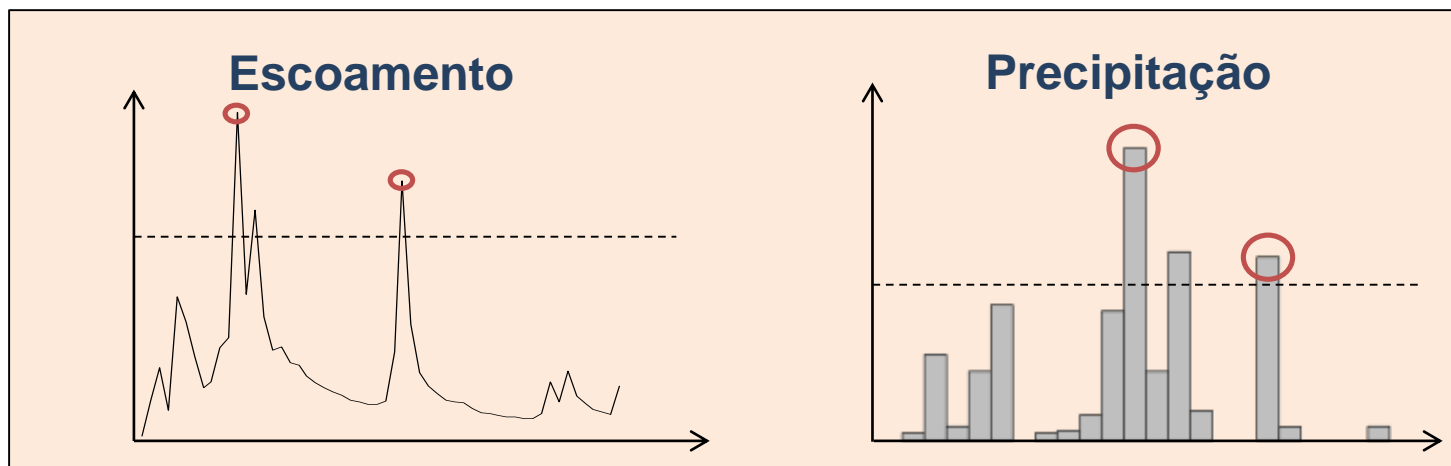
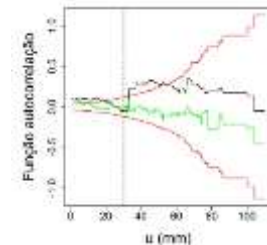
3. Análise da **variação da excedência média em função do limiar**: limiar localizado num trecho aproximadamente linear (ascendente, descendente ou horizontal).



**Mean excess plot ou
mean residual life plot**

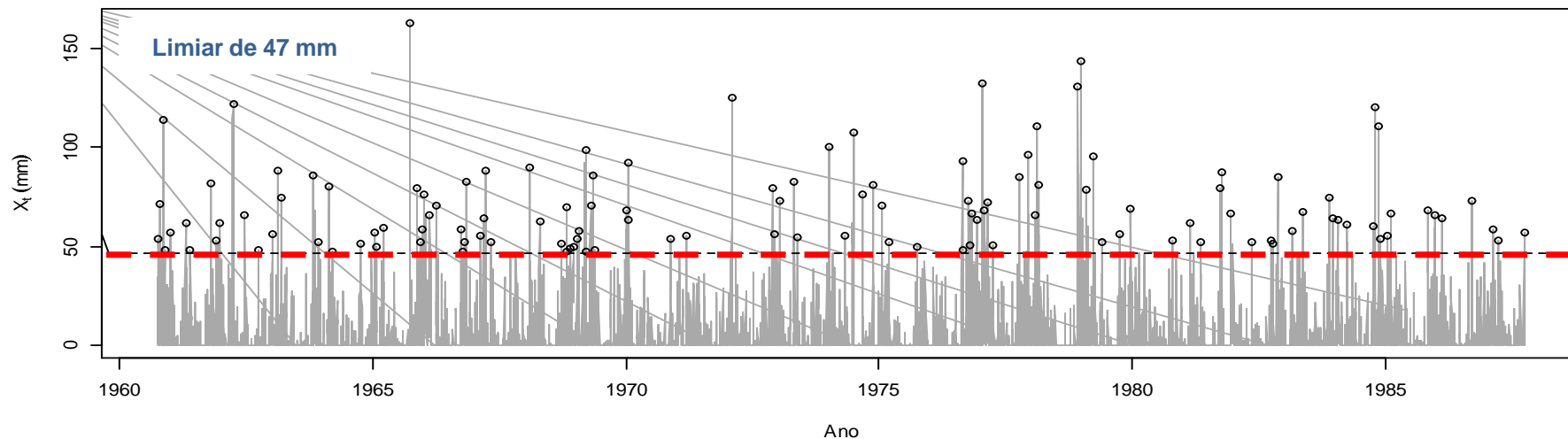


Paralelamente, foram desenvolvidos e testados diferentes critérios para identificação de acontecimentos, uma vez fixado o limiar
(verificação da independência serial com base nas correlações de incremento 1 e 2)

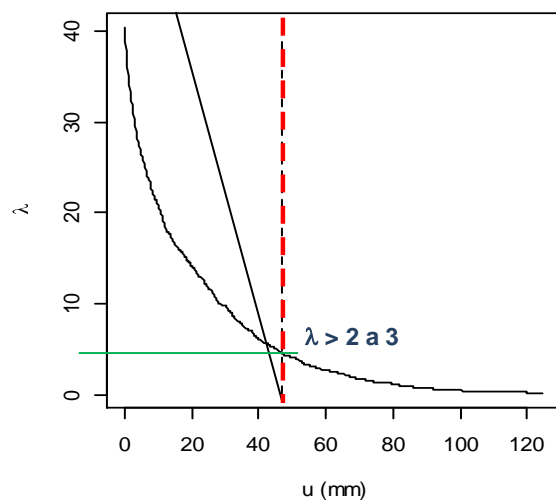


Limiar de 7 Q_{mod} e seleção dos picos acima desse limiar desde que (1) o intervalo de tempo entre dois picos consecutivos fosse, pelo menos, triplo do tempo para a ponta da bacia hidrográfica e (2) nesse intervalo de tempo o caudal decrescesse pelo menos até dois terços do primeiro pico.

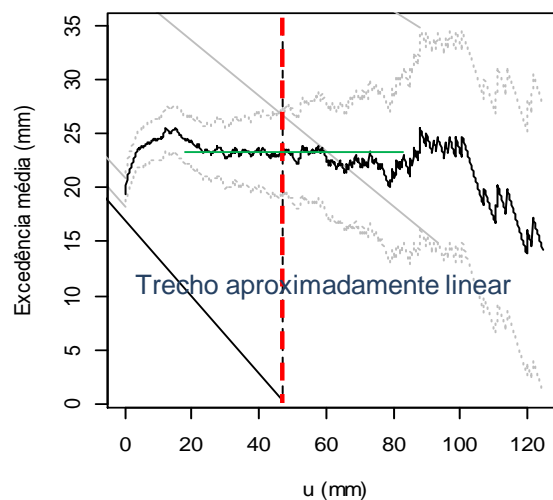
Seleção das precipitações acima do limiar desde que entre cada dois valores extremos ocorresse pelo menos 1 dia sem precipitação.



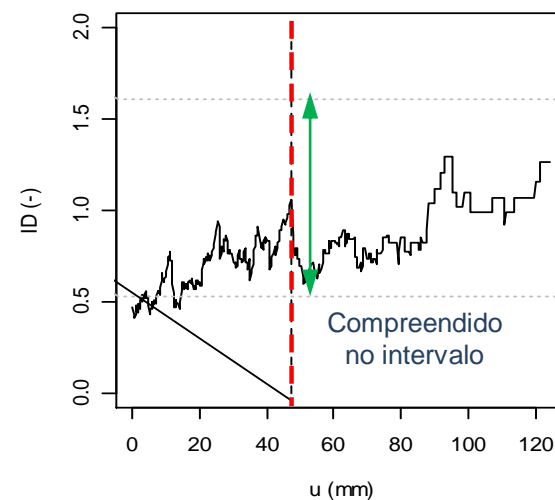
N.º médio de acontecimentos/ano



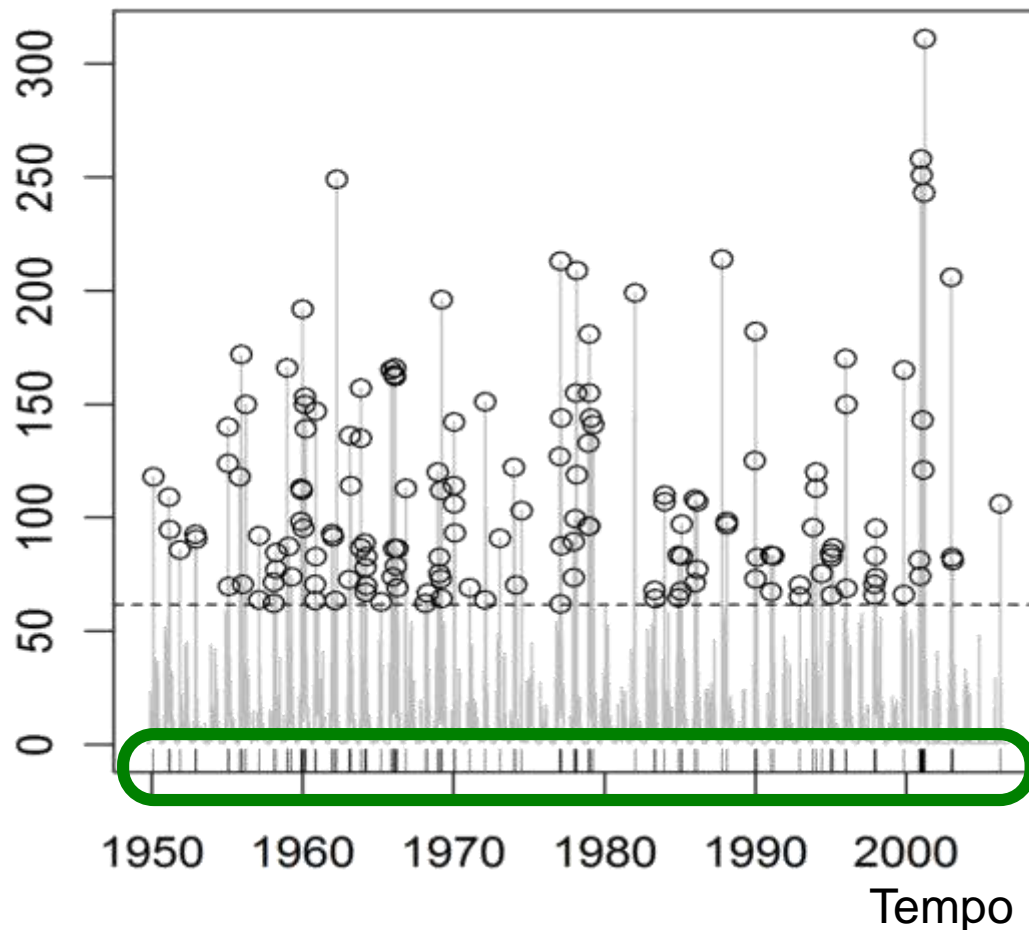
variação da excedência média em
função do limiar (mean residual life plot)



Estatística de Fisher ou Índice
de dispersão



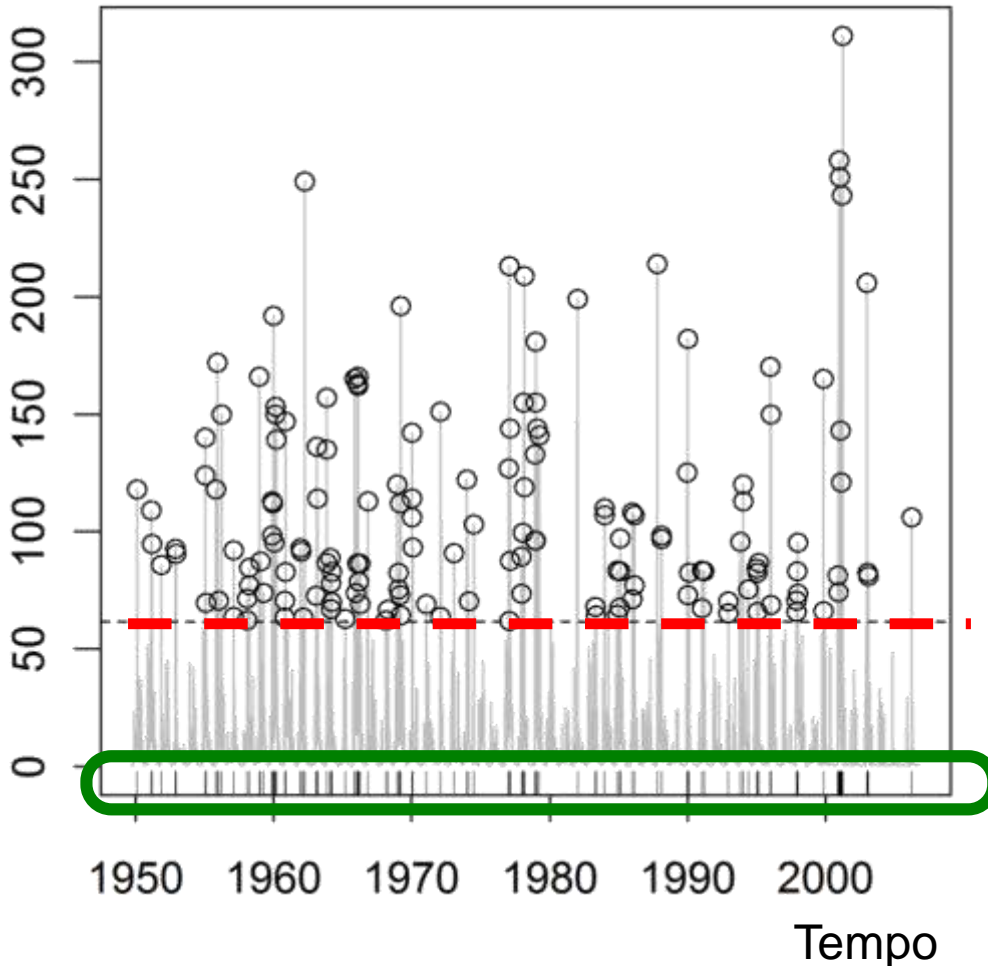
Caudal médio diário (m^3/s)



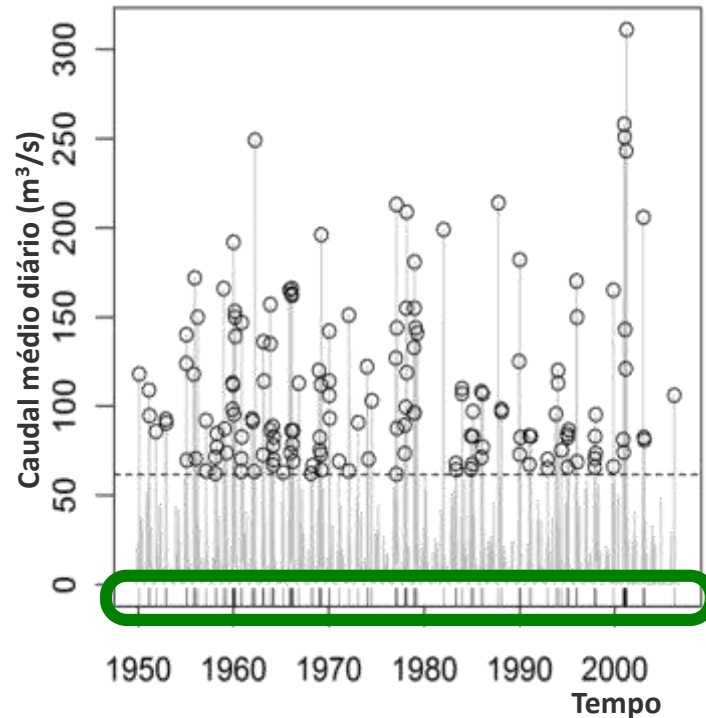
Pretendendo-se estudar a **frequência de um dado acontecimento extremo** e não a sua **magnitude**, a amostra a analisar é constituída pelos **instantes de ocorrência dos picos** previamente identificados

Amostra a analisar

Caudal médio diário (m^3/s)



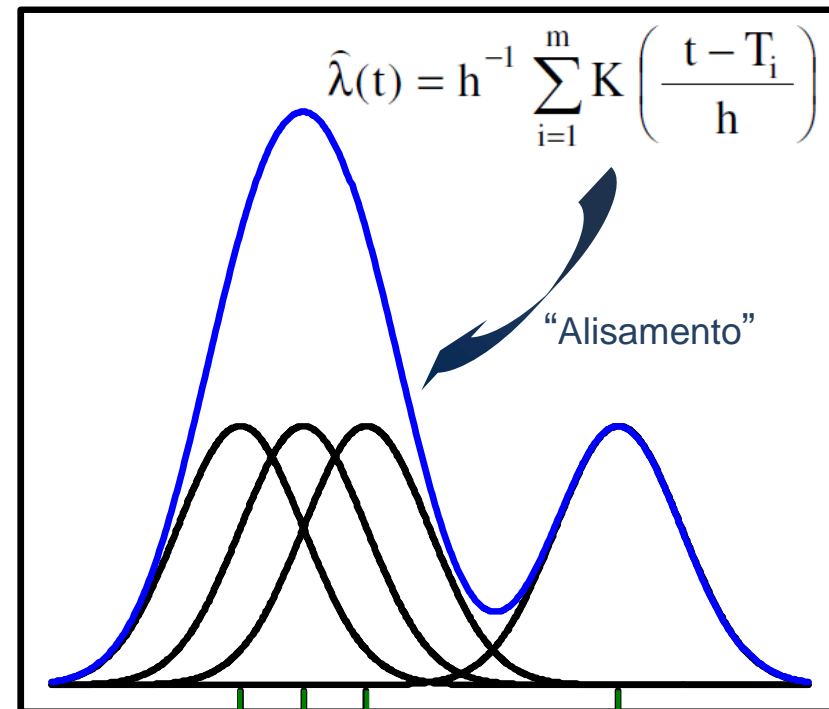
A caracterização da **frequência dos acontecimentos extremos**, em termos de valor e da variação ao longo do tempo, utilizou um **estimador não-paramétrico** aplicado aos **instantes de ocorrência das cheias** designado por **KORE** (*kernel occurrence rate estimator* ou estimativa de densidade kernel).



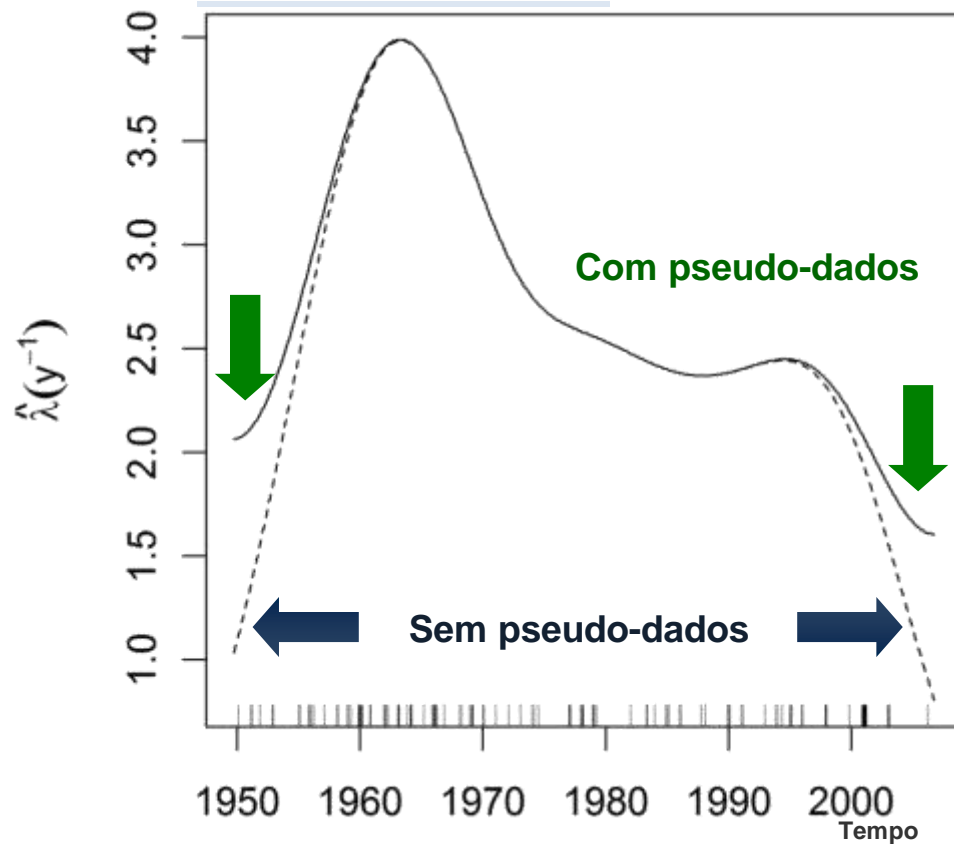
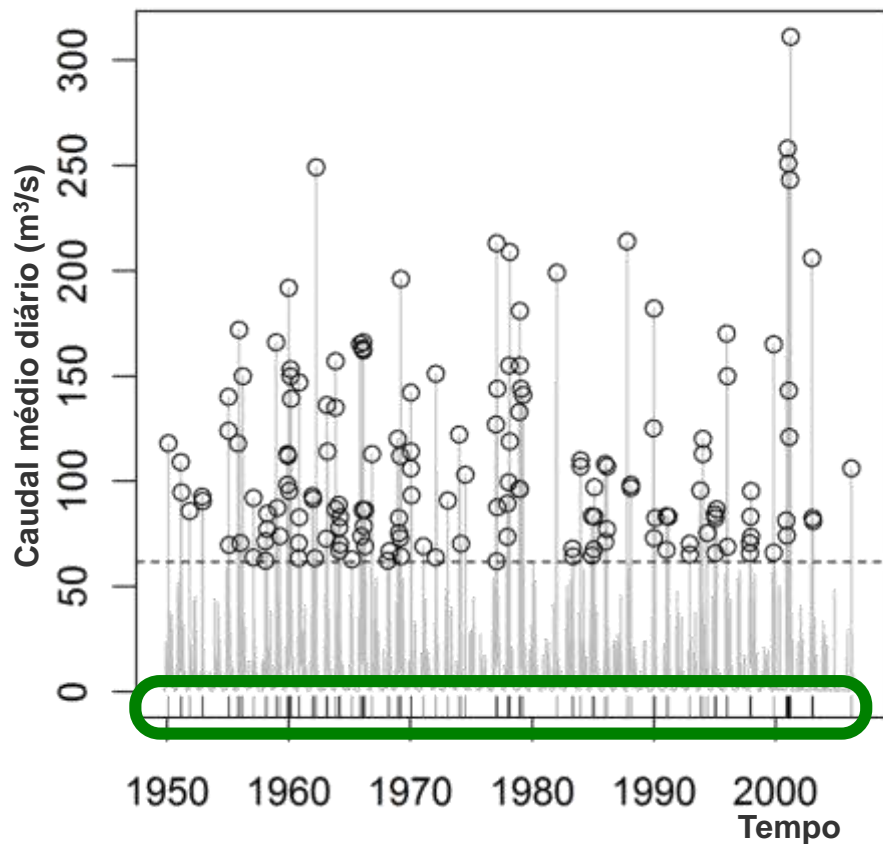
... em cada instante ...
kernel Gaussiano

$$K(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)$$

... ao conjunto dos **kernels** ...
estimador de frequência, KORE

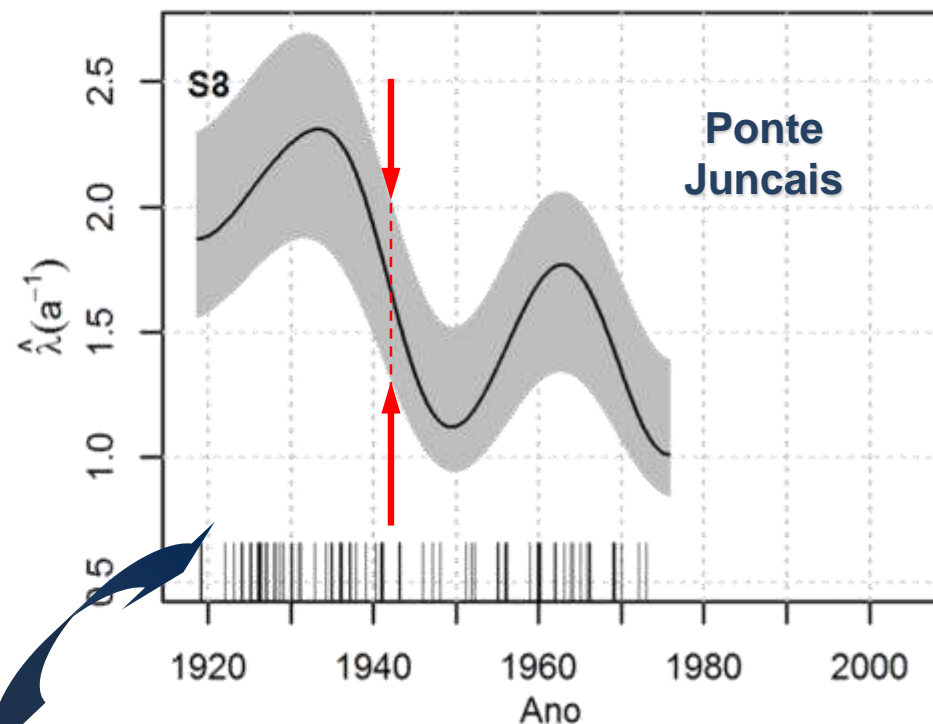
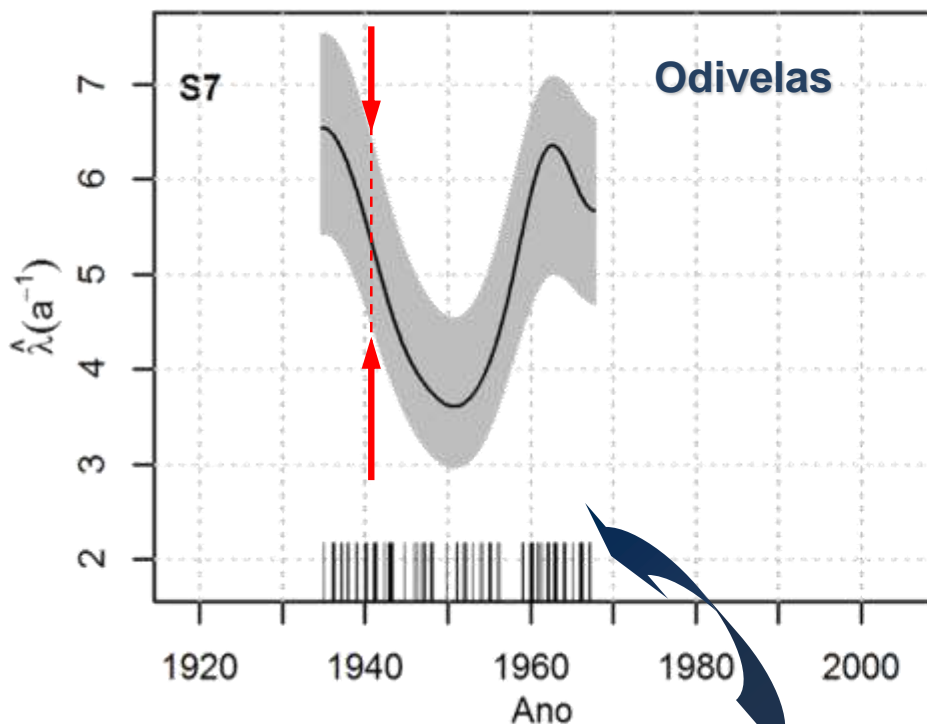


O estimador KORE indica, continuamente ao longo do tempo, o número esperado por ano de eventos extremos acima do limiar – frequência (a largura de banda, h , é um factor de alisamento que “esbata” tanto mais os resultados quanto maior o seu valor, por fazer intervir mais instantes no cálculo do KORE).



Para reduzir o viés nos extremos do intervalo de cálculo, antecedendo a estimativa do KORE geraram-se pseudo-dados (pelo método da reflexão, conducente a um padrão temporal de ocorrência de eventos simétrico do registado) para dois períodos de tempo, um anterior ao instante inicial, e, outro, sucedendo-se ao instante final, cada com a duração tripla de h .

Para quantificar **incertezas**, construíram-se **bandas de confiança**, por recurso à **re-amostragem com reposição de *bootstrap*** aplicada às **SDP**. O procedimento de re-amostragem foi repetido até que fossem obtidas **2000 curvas** com base nas quais foram construídos os **intervalos de confiança a 95%**.



Instantes de ocorrência de eventos de cheia



Direção-Geral de Agricultura
e Desenvolvimento Rural

6 de Abril 2018

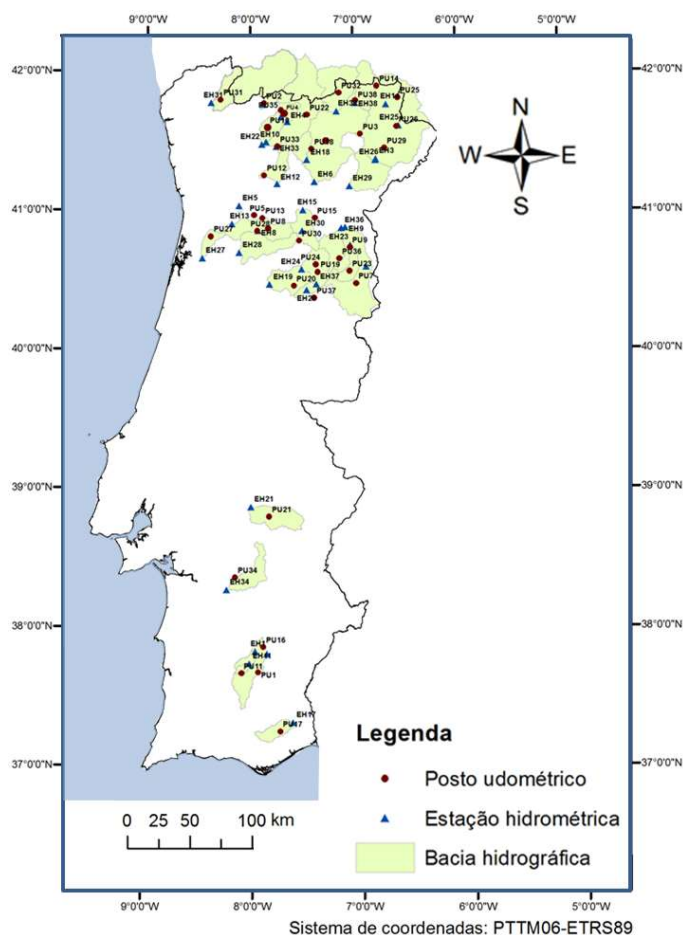


DECIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL, ARQUITETURA E GEORRECURSOS
TÉCNICO LISBOA

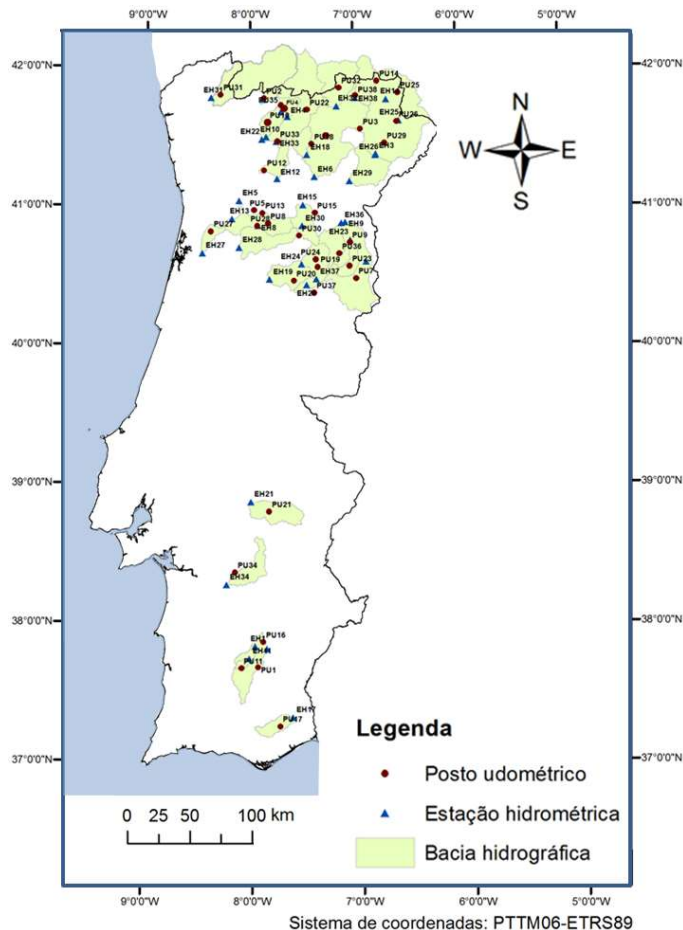
CERIS : Civil Engineering Research
and Innovation for
Sustainability

3. Casos de estudo

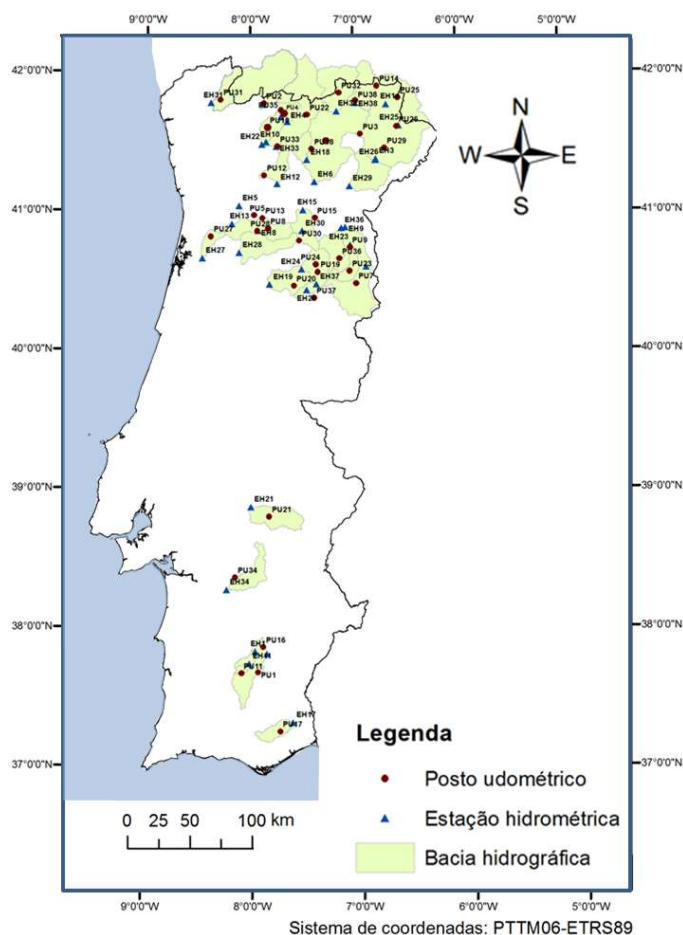




✓ **35 casos de estudos** referentes a **estações hidrométricas (EH)**, dispondo de **séries longas de caudais médios diários** e previsivelmente em **condições naturais** no que respeita ao controlo de cheias.



- ✓ 35 casos de estudos referentes a estações hidrométricas (EH), dispondo de séries longas de caudais médios diários e previsivelmente em condições naturais no que respeita ao controlo de cheias.
- ✓ A cada estação hidrométrica foi associado pelo menos um posto udométrico (PU), localizado no interior da respetiva bacia hidrográfica ou nas suas proximidades (de modo a ser relevante em termos do processo precipitação intensa/génese da cheia), dispondo de séries longas de precipitações diárias.

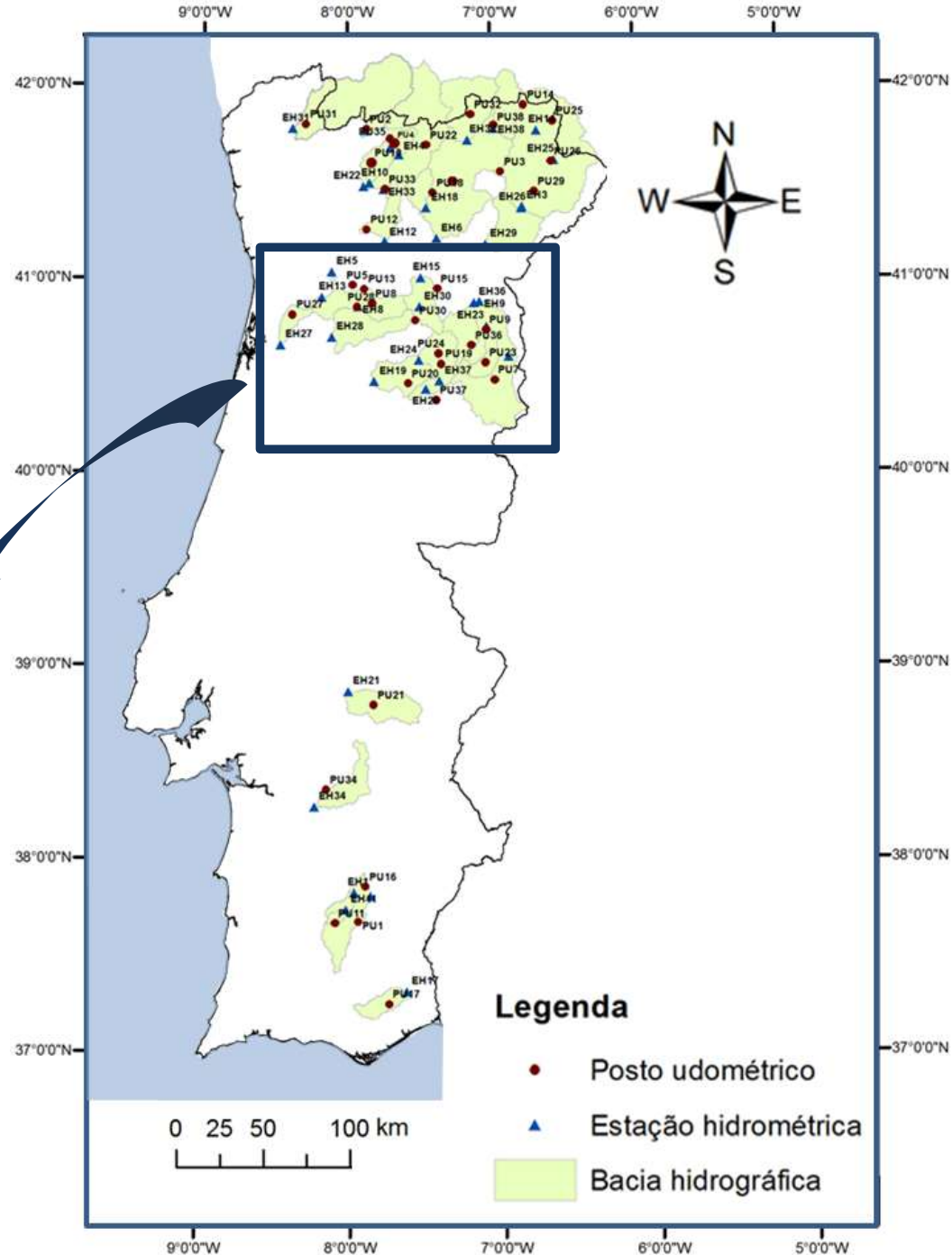
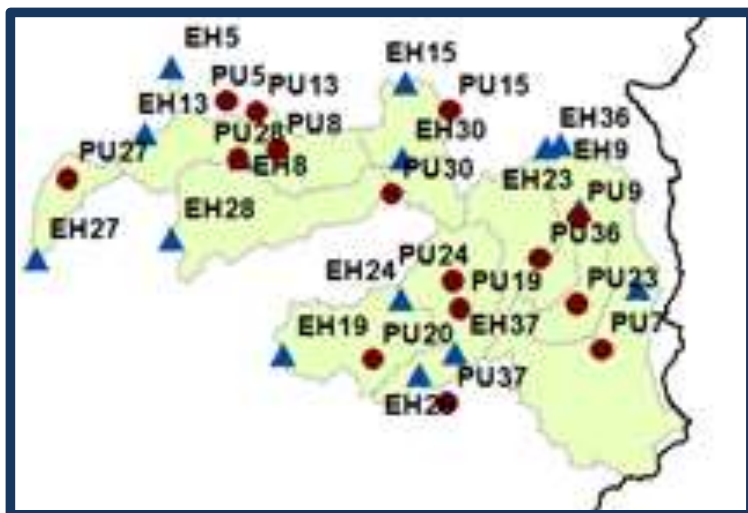


- ✓ 35 casos de estudos referentes a estações hidrométricas (EH), dispondo de séries longas de caudais médios diários e previsivelmente em condições naturais no que respeita ao controlo de cheias.
- ✓ A cada estação hidrométrica foi associado pelo menos um posto udométrico (PU), localizado no interior da respetiva bacia hidrográfica ou nas suas proximidades (de modo a ser relevante em termos do processo precipitação intensa/génese da cheia), dispondo de séries longas de precipitações diárias.

- ✓ A comparação das frequências das cheias e das precipitações intensas presumivelmente associadas à sua génese destinou-se também a confirmar que se está perante bacias hidrográficas em regime natural.

Localização esquemática dos 35 casos de estudos

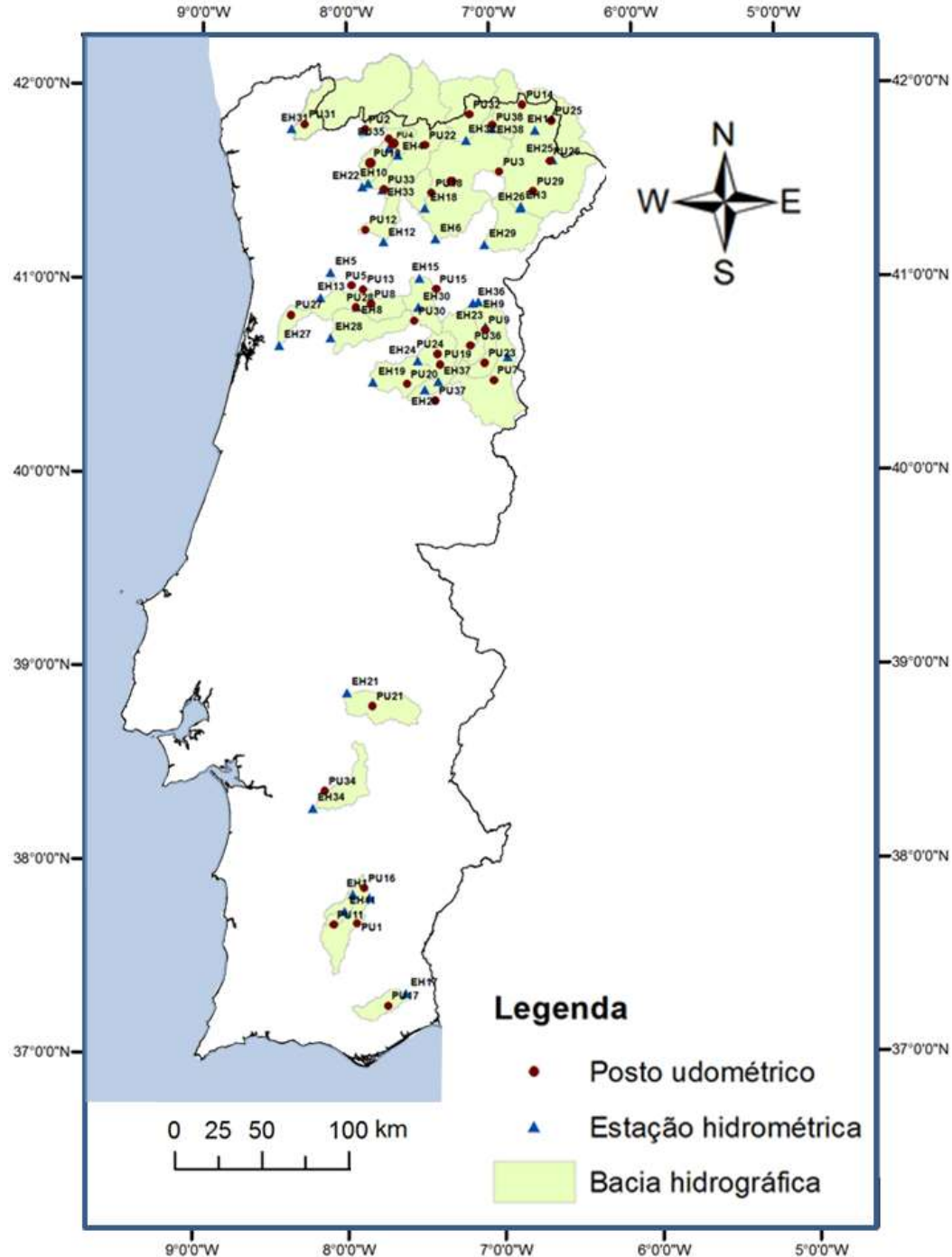
Associação entre EHs e PUs



Localização esquemática dos 35 casos de estudos

Estações hidrométricas
com áreas de bacia
hidrográfica compreendidas
entre **17 e 3718 e km²**
(média de 713 km³) e com
períodos de registos entre
28 e 83 anos (média de
48 anos)

(...preenchimento de falhas
nas precipitações diárias e nos
caudais médios diários...)





Direção-Geral de Agricultura
e Desenvolvimento Rural

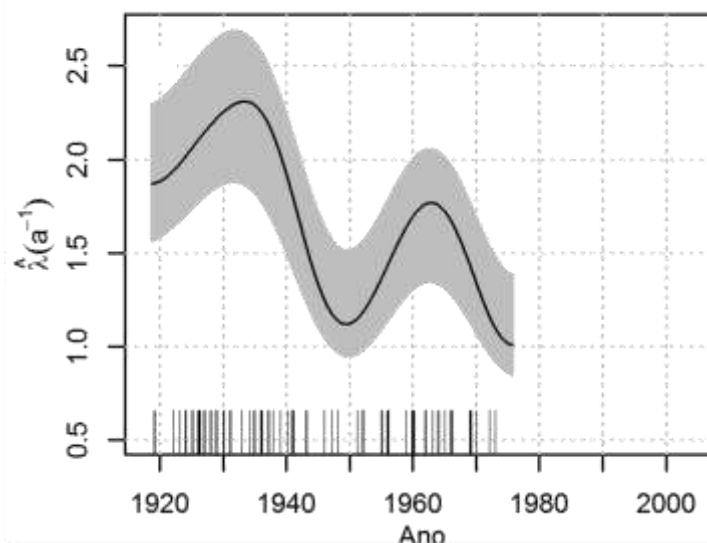
6 de Abril 2018

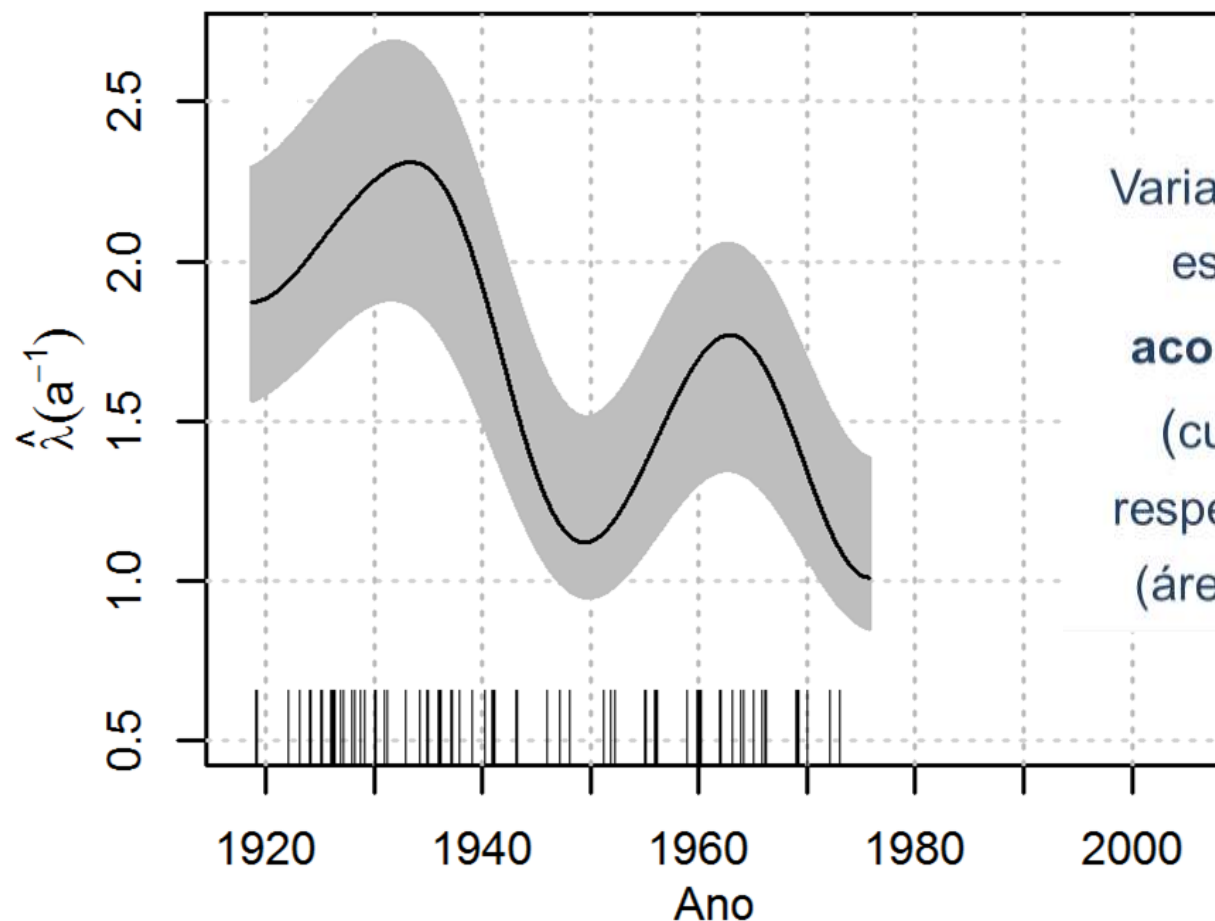


DECIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL, ARQUITETURA E GEORRECURSOS
TÉCNICO LISBOA

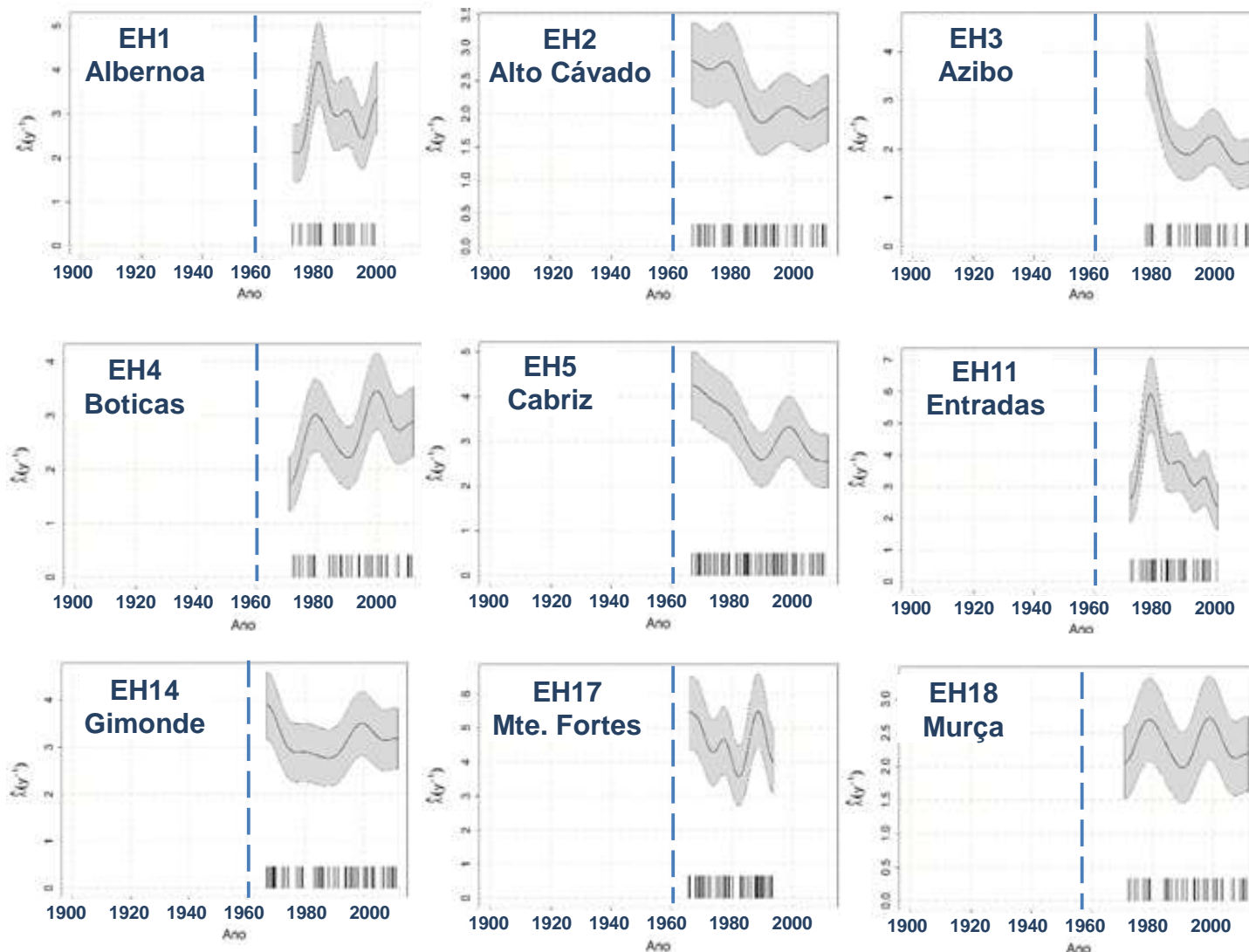
CERIS : Civil Engineering Research
and Innovation for
Sustainability

4. Resultados

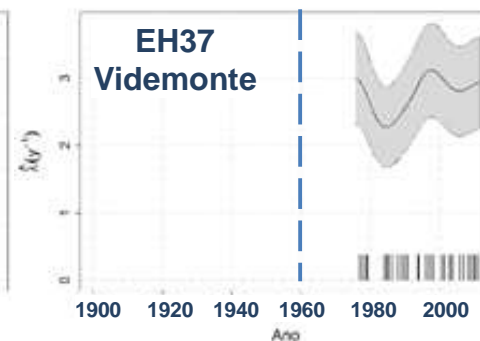
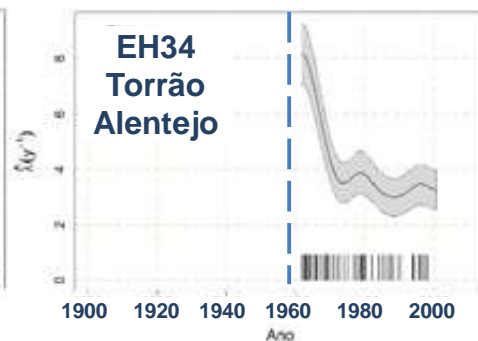
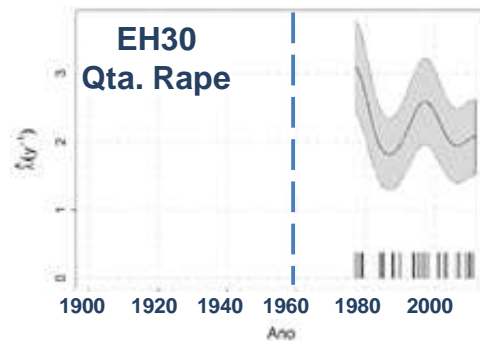
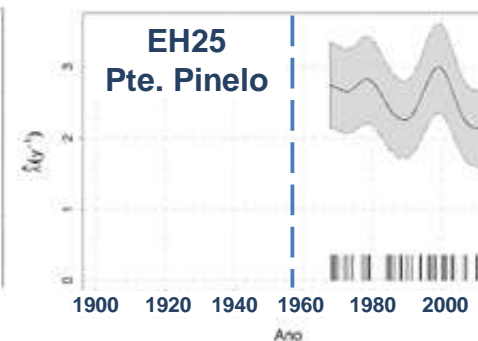
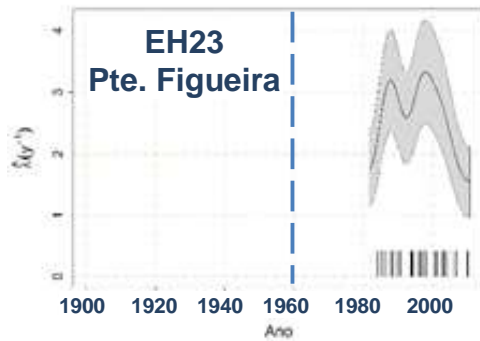
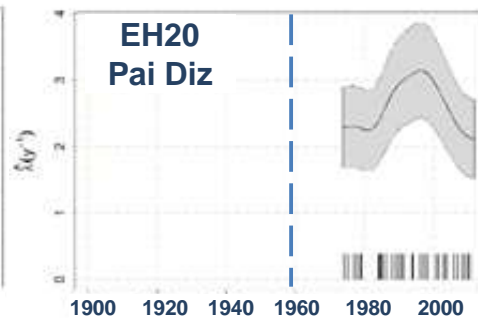
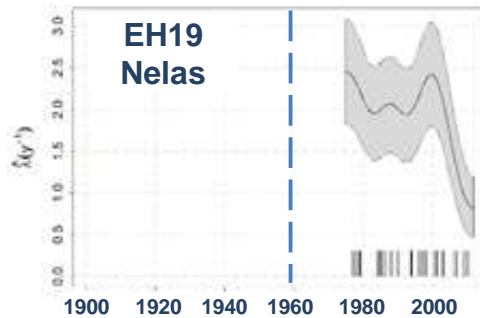




Variação ao longo do tempo da
estimativa do **número de
acontecimentos por ano, $\hat{\lambda}$**
(curva contínua a preto) e
respetiva **banda de confiança**
(área sombreada a cinzento)



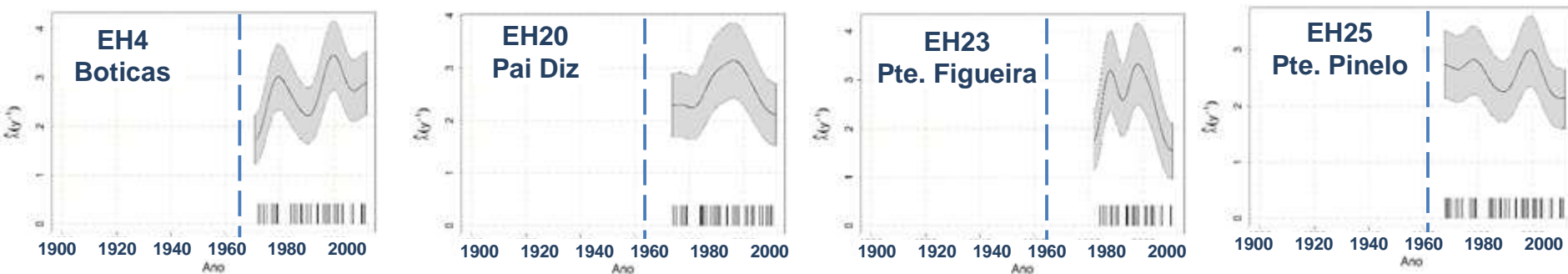
**Frequência das
cheias nas
16 estações
hidrométricas
com registos
posteriores a
1960/61**



**Frequência das cheias nas
16 estações hidrométricas
com registos posteriores a
1960/61 (cont.)**

16 estações hidrométricas com registos posteriores a 1960/61. Conclusões (análise condicionada à menor representatividade dos dados)

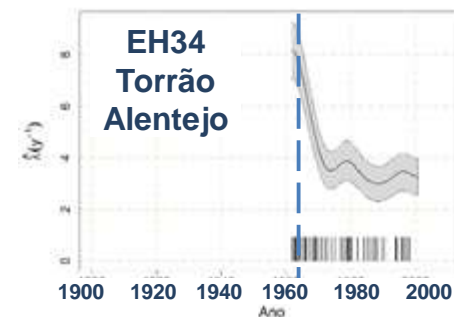
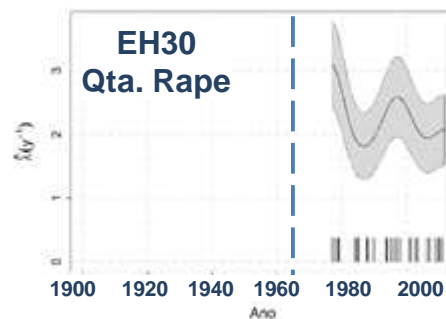
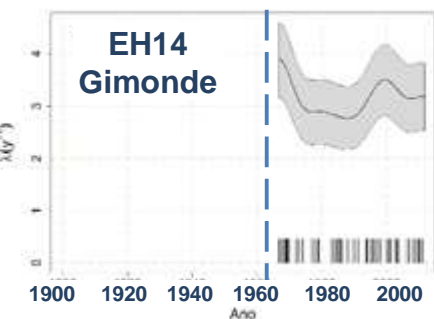
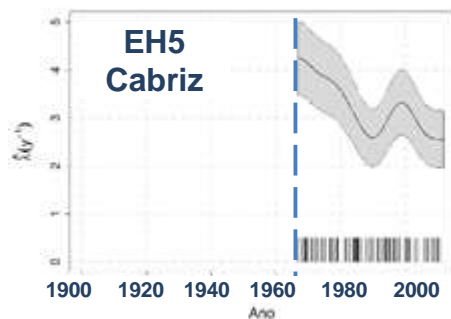
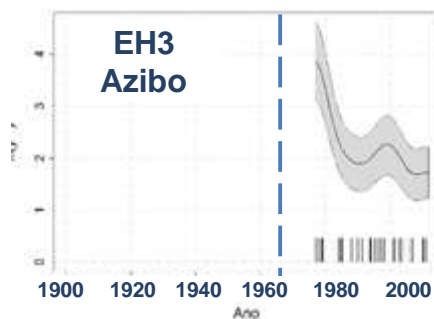
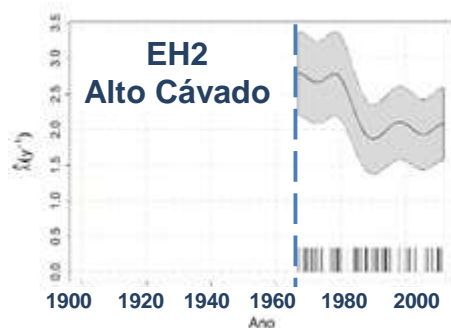
1. Quando o período analisado se estende até anos recentes e salvo algumas exceções que indicam cheias mais frequentes em anos próximos de 1990,

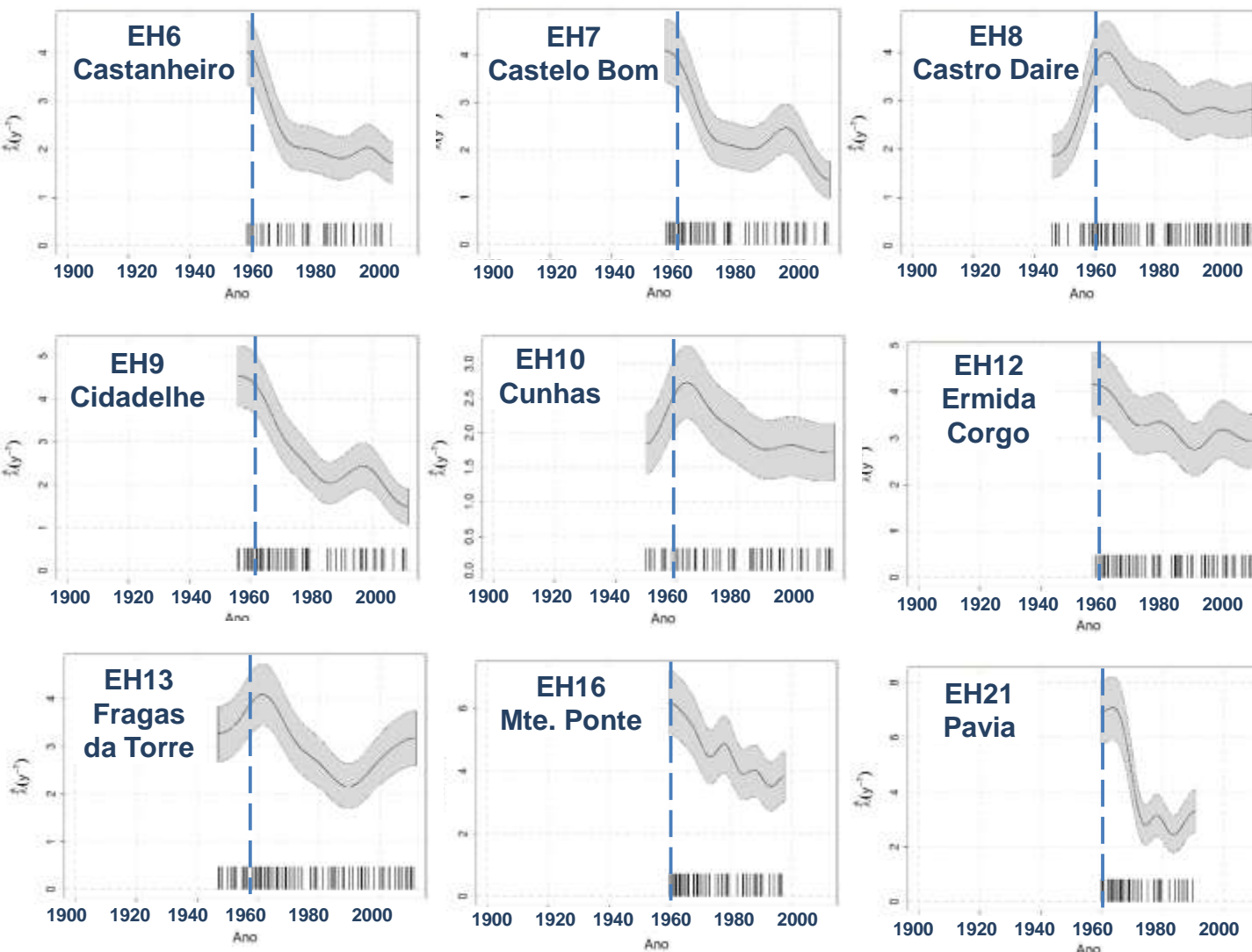


16 estações hidrométricas com registos posteriores a 1960/61. Conclusões (análise condicionada à menor representatividade dos dados)

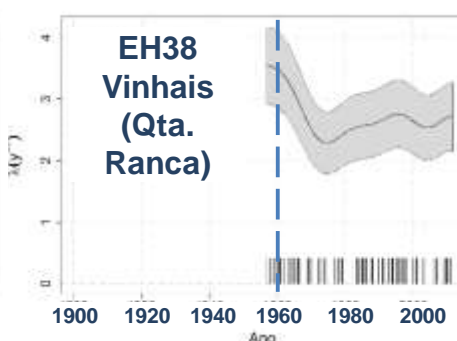
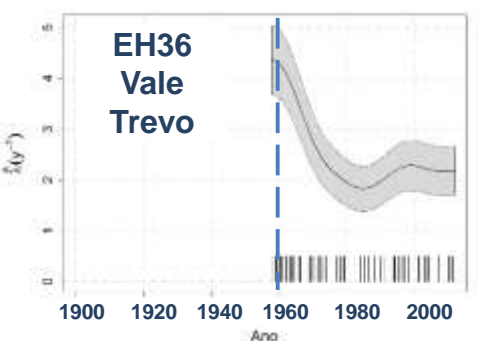
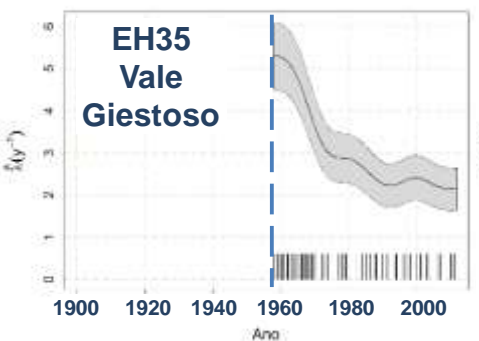
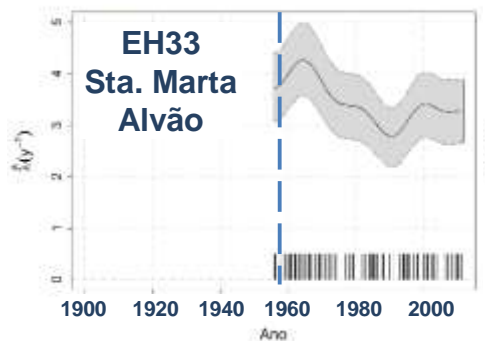
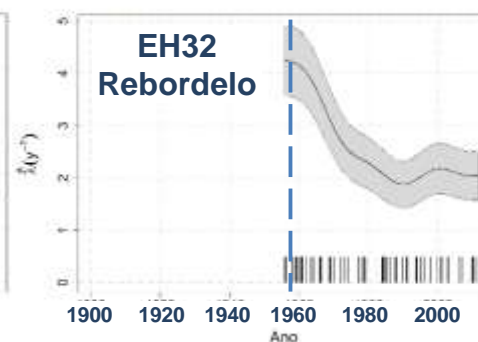
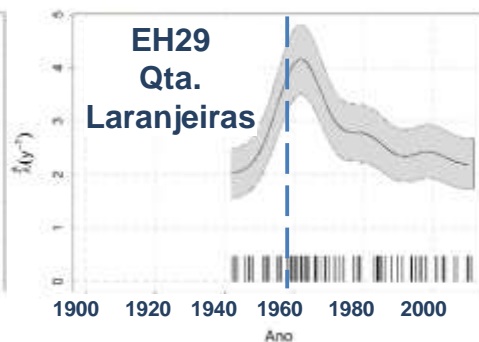
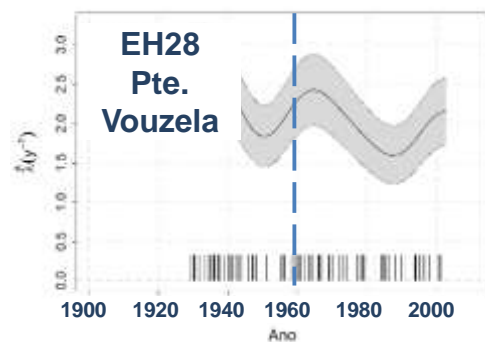
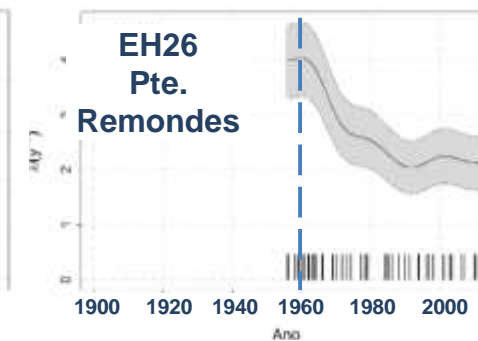
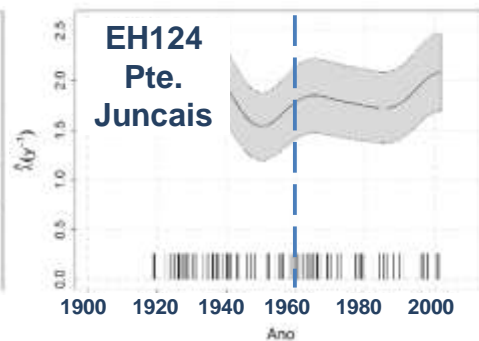
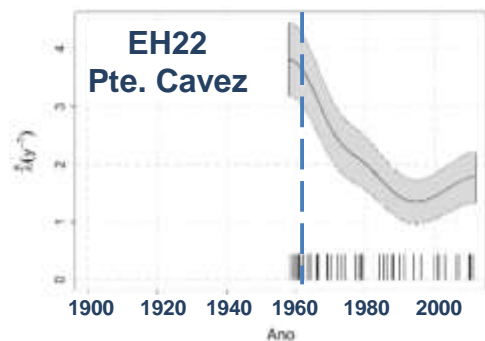
- Quando o período analisado se estende até anos recentes e salvo algumas exceções que indicam cheias mais frequentes em anos próximos de 1990, a maior parte das estações sugere claramente um decrés-

cimo da frequência da ocorrência de cheias ao progredir-se para o presente!





**Frequência das
cheias nas
restantes
19 estações
hidrométricas
com registos
pelos menos
desde 1960/61**

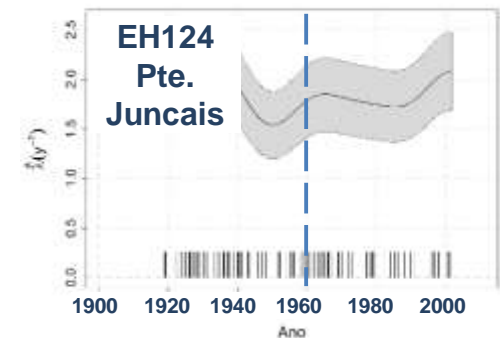
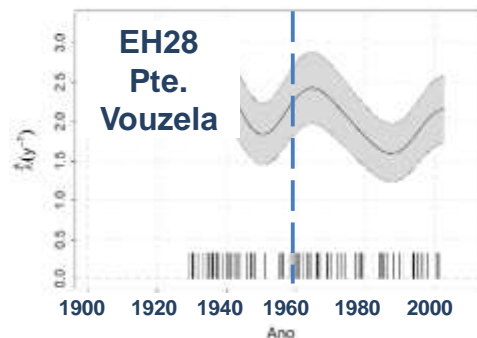
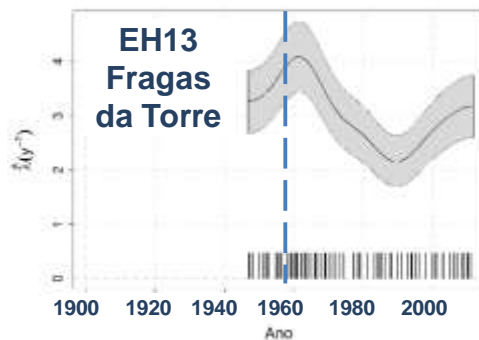


**Frequência das
cheias nas
restantes
19 estações
hidrométricas
com registos
pelos menos
desde 1960/61
(cont.)**

19 estações hidrométricas com registos pelo menos desde 1960/61.

Conclusões

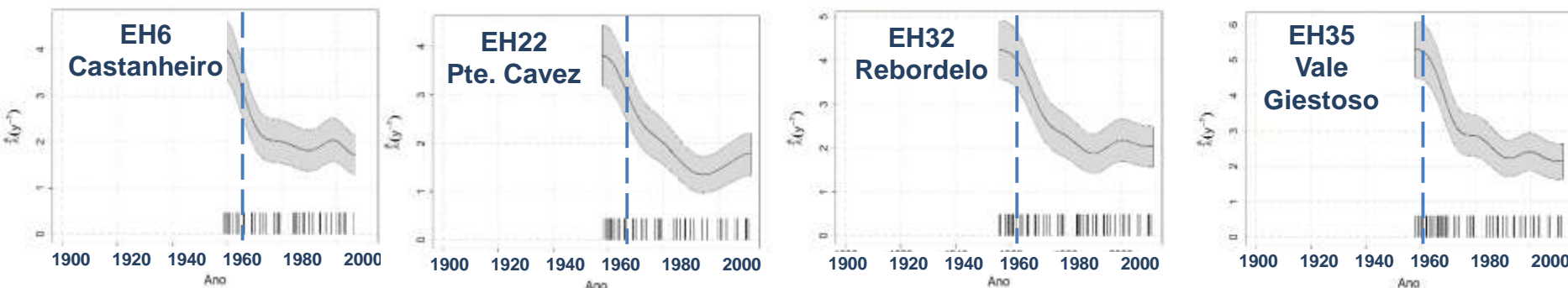
1. Apenas 3 casos indicam aumento da frequência das cheias em anos recentes; num desses casos o período com mais cheias ocorreu mesmo próximo de 2000.



19 estações hidrométricas com registos pelo menos desde 1960/61.

Conclusões

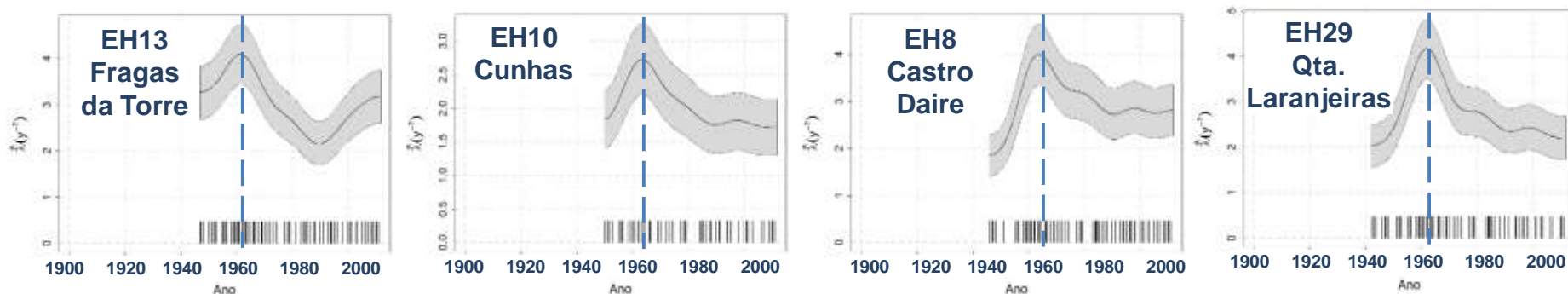
1. Apenas 3 casos indicam aumento da frequência das cheias em anos recentes; num desses casos o período com mais cheias ocorreu mesmo próximo de 2000.
2. Todos os restantes casos indicam consistentemente cheias menos frequentes em anos mais recentes.



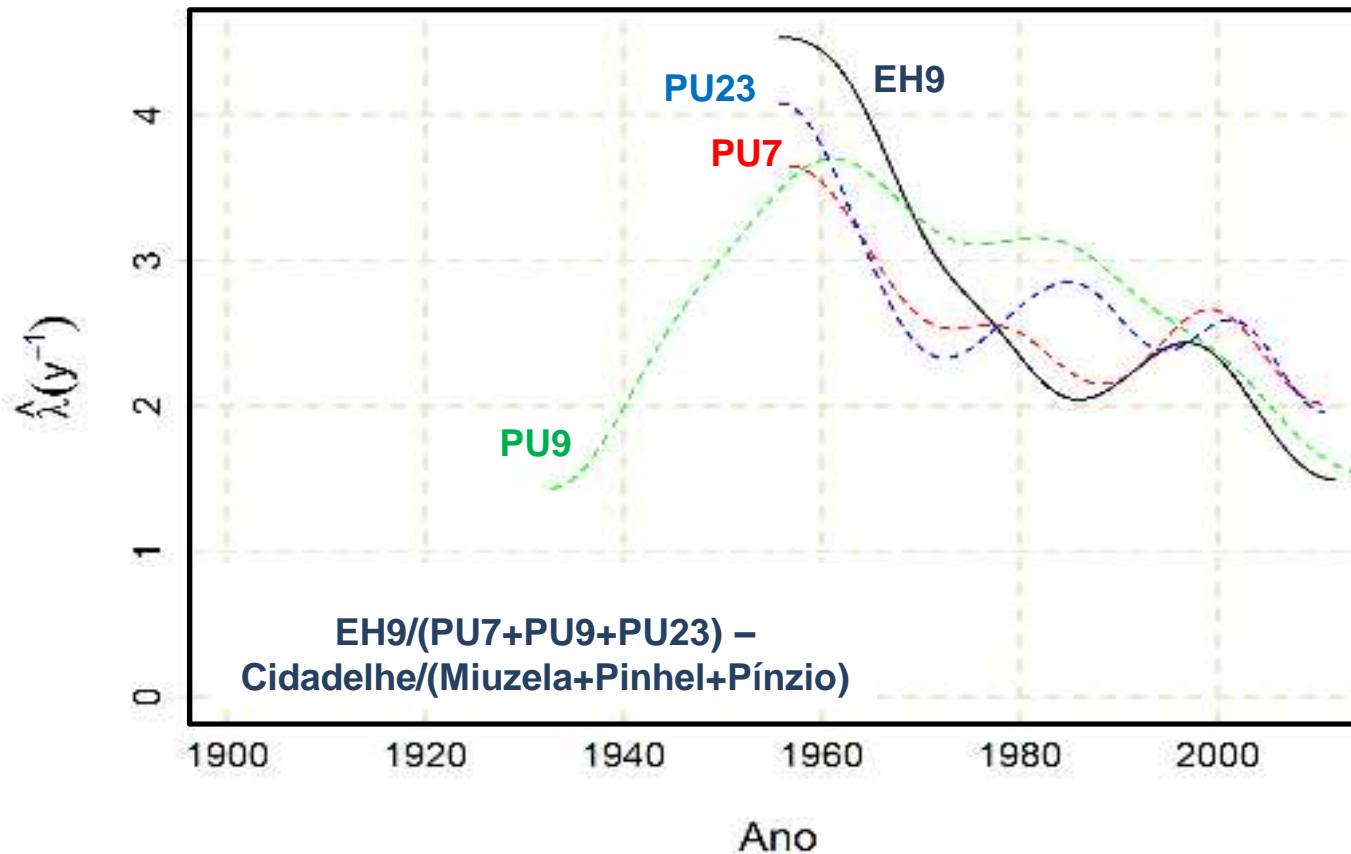
19 estações hidrométricas com registos pelo menos desde 1960/61.

Conclusões

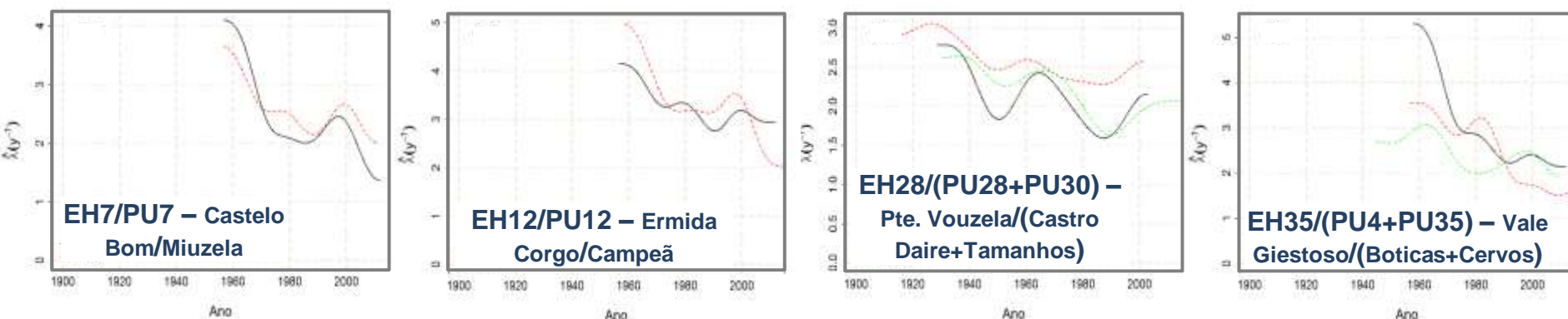
1. Apenas 3 casos indicam aumento da frequência das cheias em anos recentes; num desses casos o período com mais cheias ocorreu mesmo próximo de 2000.
2. Todos os restantes casos indicam consistentemente cheias menos frequentes em anos mais recentes.
3. Com exceção de Pte. de Juncais, os registos, quando disponíveis, indicam nitidamente frequências máximas das cheias na década de 1960.



Análise conjunta da **frequência das cheias** na bacia hidrográfica de uma dada estação hidrométrica (**curva a preto**) e **das precipitações extremas** em postos presumivelmente com influência nessa bacia (**restantes curvas, a cores**)



- ✓ Não obstante a validade da comparação entre frequências das cheias e das precipitações extremas que se admitiu estarem na sua génese depender da localização relativa da bacia hidrográfica e dos postos udométricos que lhe foram associados, constatou-se haver, por regra, **razoável concordância entre padrões de variação temporal daquelas frequências.**



- ✓ Bacias hidrográficas muito razoavelmente em regime natural, no que respeita à génese das cheias.
- ✓ Frequência das precipitações extremas com padrões temporais próximos dos detetados para as cheias



Direção-Geral de Agricultura
e Desenvolvimento Rural

6 de Abril 2018



DECIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL, ARQUITETURA E GEORRECURSOS
TÉCNICO LISBOA

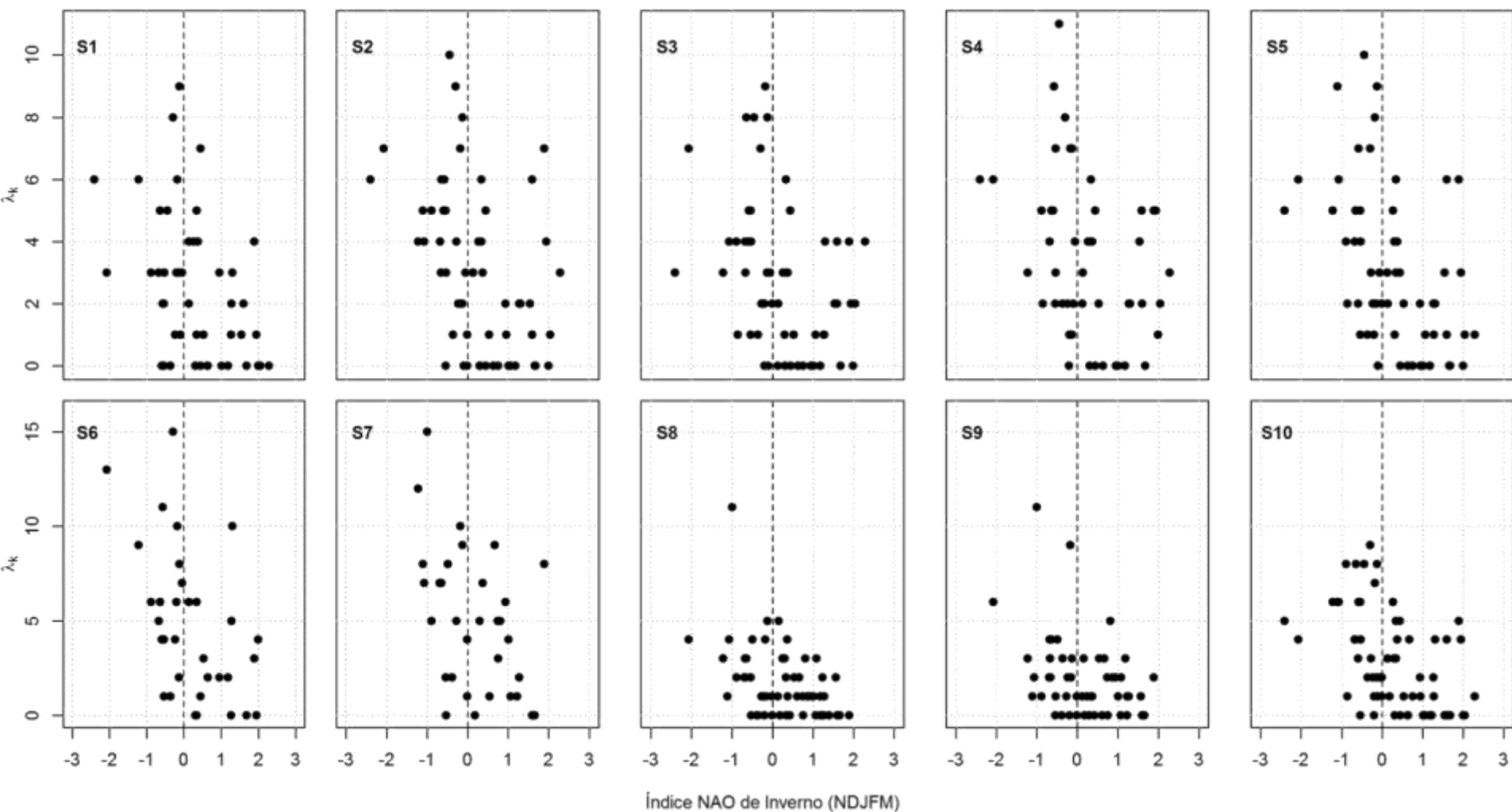
CERIS : Civil Engineering Research
and Innovation for
Sustainability

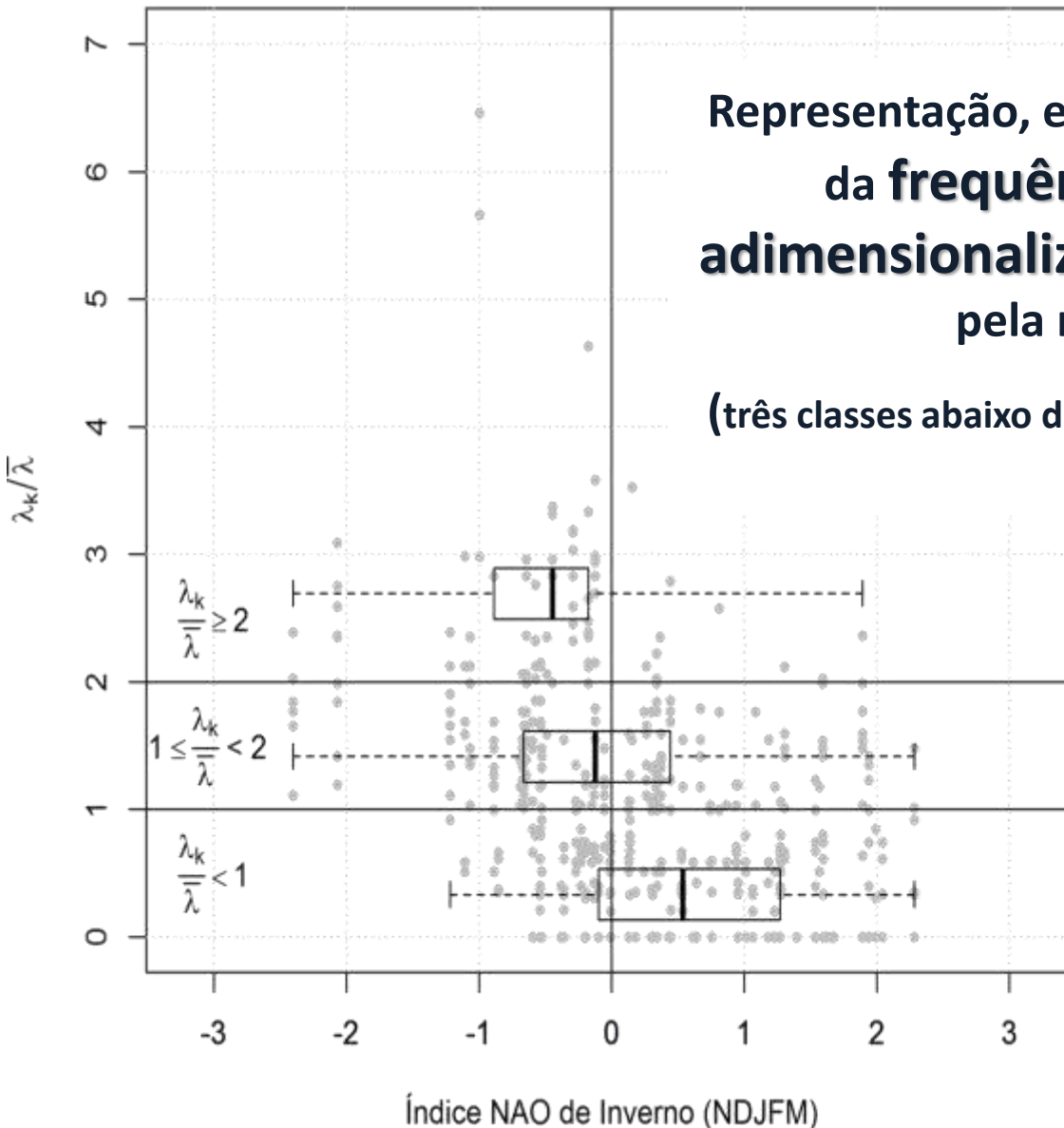
5. Conclusões

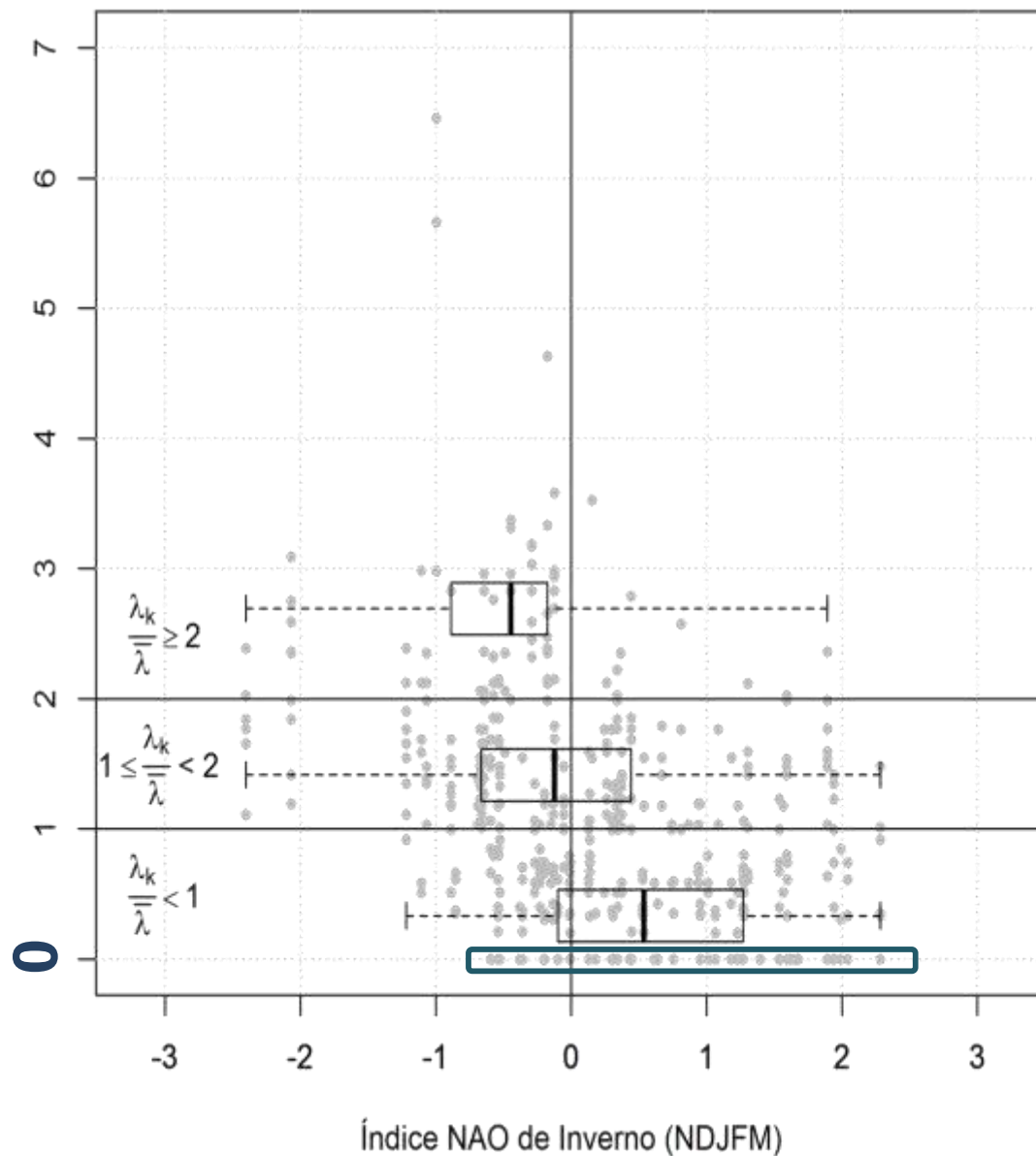


- ✓ De modo geral, constatou-se haver uma **variabilidade interanual acentuada** e indicadora de **comportamento não estacionário** (passado \neq presente).
- ✓ Existe uma razoável concordância entre o comportamento exibido pela **frequência das cheias e das precipitações extremas**.
- ✓ Por regra, há a sugestão de que a **frequência dos acontecimentos hidrológicos extremos** analisados exhibe uma **tendência decrescente**, com valores mínimos ou próximos dos mínimos em anos recentes.
- ✓ Quando a extensão dos registos permite analisar, concluiu-se que os **acontecimentos hidrológicos extremos** apresentaram **frequências máximas** na década de **1960**.
- ✓ Abordagem suscetível de ser aplicada a outras variáveis hidrológicas (**secas**).
- ✓ Abordagem compatível com a análise de fenómenos hidrológicos extremos fazendo intervir os designados índices de teleconexão, como sejam a **oscilação do Atlântico Norte, NAO**.

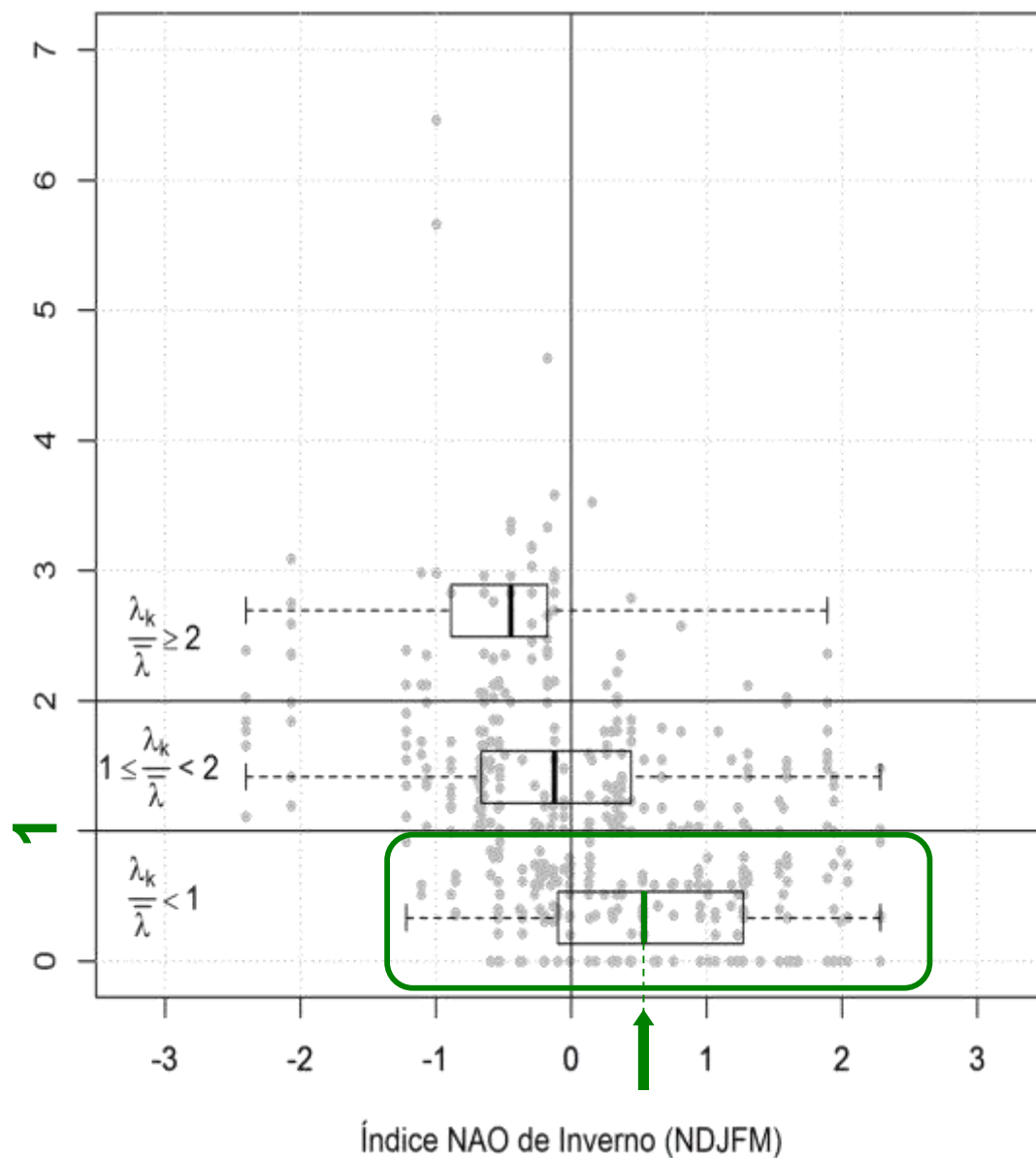
Representação da frequência anual das cheias, λ_k , em função da NAO(NDJFM)



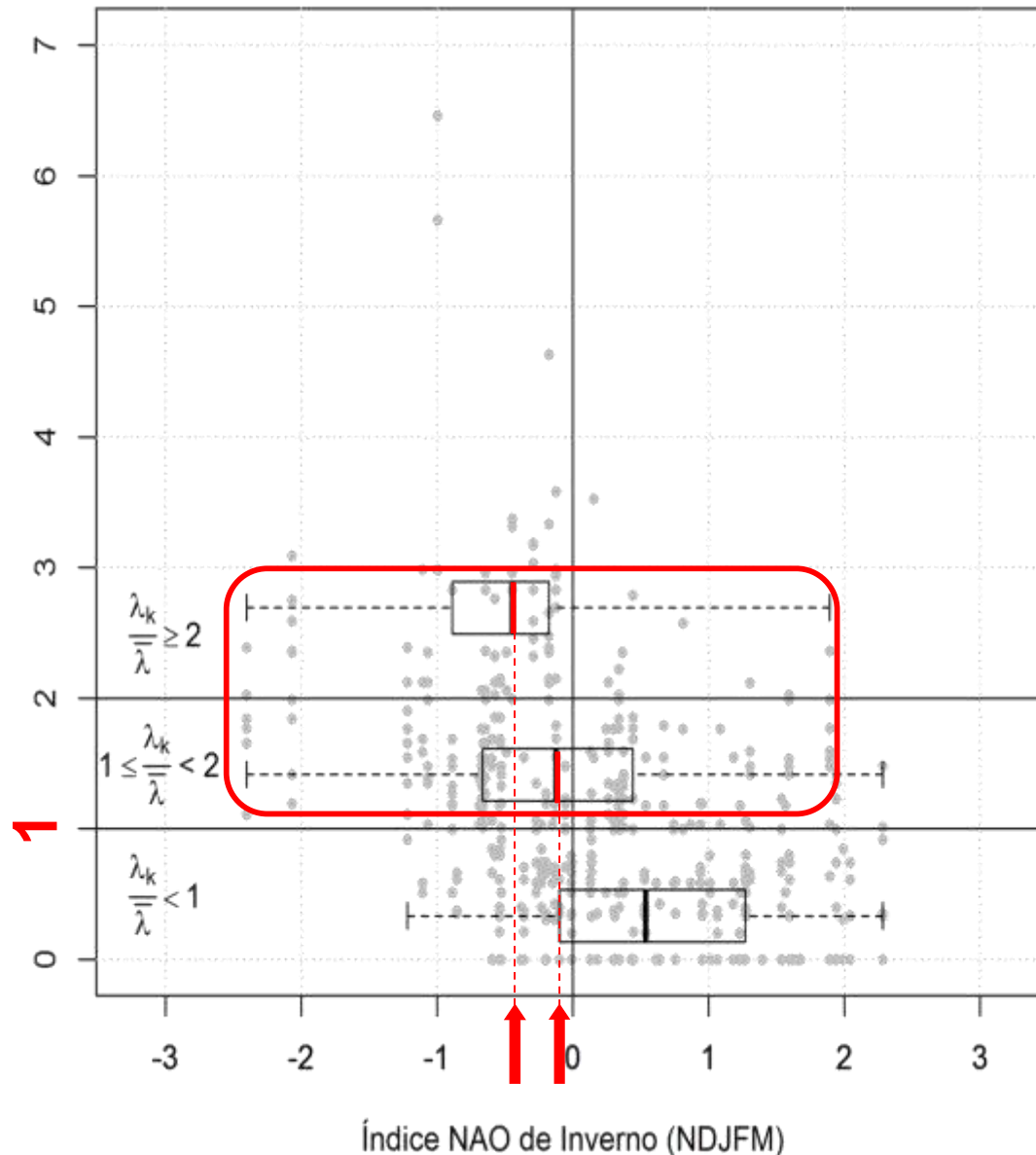




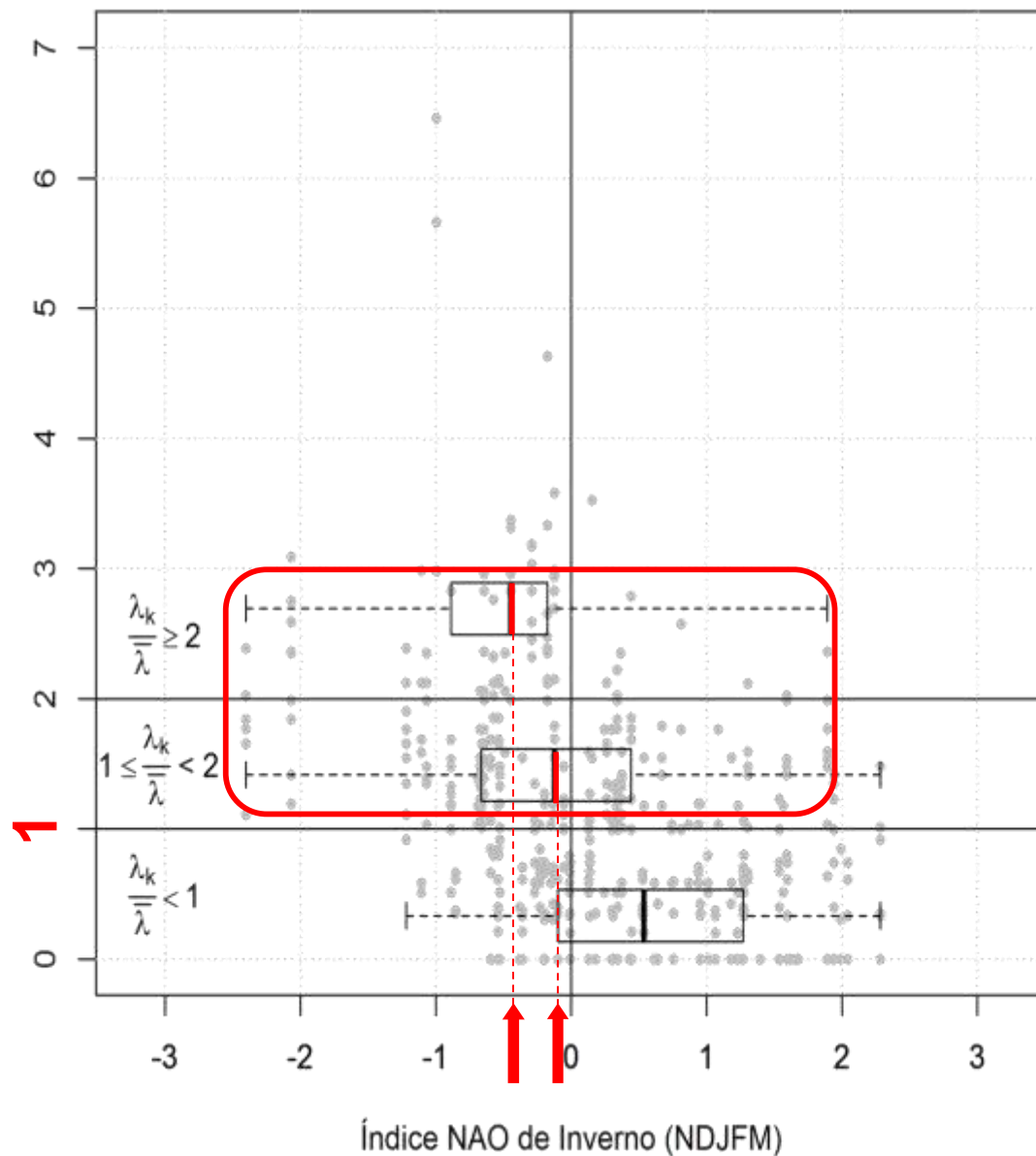
1. A maioria dos anos sem cheias corresponde a índices positivos da NAO.



1. A maioria dos anos sem cheias correspondem a índices positivos da NAO.
2. Anos com número de cheias inferior à média tendem a ocorrer quando a NAO está na sua fase positiva (mediana).



1. A maioria dos anos sem cheias corresponde a índices positivos da NAO.
2. Anos com número de cheias inferior à média tendem a ocorrer quando a NAO está na sua fase positiva (mediana).
3. Anos com um maior número de cheias tendem a ocorrer quando a NAO está na sua fase negativa (medianas).



A NAO poderá constituir um dos
descritores a incluir nos
modelos não estacionários da
análise de cheias.



Direção-Geral de Agricultura
e Desenvolvimento Rural

6 de Abril 2018



DECIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL, ARQUITETURA E GEORRECURSOS
TÉCNICO LISBOA

CERIS

Civil Engineering Research
and Innovation for
Sustainability

Análise da frequência de acontecimentos hidrológicos extremos em Portugal Continental

- modelação não-paramétrica de valores extremos de precipitação e
de caudal -**

Maria Manuela Portela

Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa (UL), CERIS, Investigação e Inovação em
Engenharia Civil para a Sustentabilidade, Portugal



Direção-Geral de Agricultura
e Desenvolvimento Rural

6 de Abril 2018

