



**Estimação de curvas intensidade-duração-frequência
baseadas em séries de duração parcial.**

Luís Pedro Santos Oliveira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Prof^a. Dra. Maria Manuela Portela Correia dos Santos Ramos da Silva

Júri

Presidente: Prof. António Alexandre Trigo Teixeira

**Orientador: Prof^a. Dra. Maria Manuela Portela Correia dos Santos Ramos da
Silva**

Vogal: Prof. Dr. António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues

Mai de 2016

“O homem não é nada além daquilo que a educação faz dele.”

Immanuel Kant

Agradecimentos

À Professora Maria Manuela Portela pela dedicação, paciência para o esclarecimento de dúvidas e enorme vontade em ajudar e melhorar o trabalho realizado. O seu apoio e ensinamentos foram absolutamente essenciais para a realização desta dissertação, quer pela sugestão do tema, quer pelos constantes reparos em busca do melhor e material facultado.

Ao IST pela minha formação superior, conhecimentos que me transmitiu e pelo crescimento que me deu.

Ao nível pessoal quero agradecer aos meus pais, Gabriela e Luís por toda a força, apoio e carinho que me deram, assim como à minha irmã Catarina também pelo auxílio em pequenas tarefas repetitivas, pequenos detalhes de formatação e enorme disponibilidade demonstrada.

Aos meus amigos, em especial à Carolina, Nuno, Rui, Kiko, Hugo, Lourenço, João, Castro e José Carlos, pela companhia, incentivo e preocupação. À Inês devo também um agradecimento especial pelo afecto, amizade, e paciência nesta importante fase da minha vida.

Obrigado e um bem-haja a todos.

Fim.

Resumo

Em Portugal Continental é geralmente usado em contexto de projeto, as designadas curvas de intensidade-duração-frequência (IDF), que relacionam a intensidade máxima da chuva com a sua duração no tempo e respetiva probabilidade ou período de retorno. Estas curvas são por norma estimadas com recurso a séries de máximos anuais (SMA), onde são recolhidos valores máximos de precipitação diária por ano para a estimação de quantis de probabilidade associados a um período de retorno.

A presente dissertação teve por objetivo estabelecer curvas IDF do tipo $i=aT^b$, para durações inferiores subdiárias e vários períodos de retorno, com recurso a uma metodologia baseada em series de duração parcial (SDP) em três postos udométricos de Portugal Continental. As SDP constituem uma alternativa às SMA por considerarem para as amostras valores extremos por serem superiores a um certo limiar definido, conseguindo assim com períodos de registos mais curtos obter amostras com dimensões razoáveis.

Com este propósito recorreu-se a uma metodologia de análise que compreende os seguintes passos: recolha de dados de precipitação horária, preenchimento de falhas existentes, análise de registos e seleção de limiares, elaboração de testes de independência estatística, cálculo de quantis de probabilidade e estimação dos parâmetros associados a cada curva IDF para a sua representação gráfica.

Concluiu-se comparando os resultados obtidos com outros que lhes antecederam que a metodologia utilizada devolve resultados que na maioria dos períodos de retorno e durações consideradas se assemelham aos já obtidos, o que lhe confere alguma razoabilidade e a constitui como uma boa alternativa. Ainda assim verificou-se que em certos casos existem disparidades que, dada a atualidade da temática das SDP e monitorização horária dos registos, demonstra ser necessário no futuro aperfeiçoar o método e dispor de mais dados para análise.

Palavras-chave: Excedências, Séries de Duração Parcial, Limiar, Curvas IDF

Abstract

In Portugal, IDF (Intensity, Duration, Frequency) curves, which relate the maximum intensity of the rain in a given time period, as well as its probability or return periods are often used within the context of a project. These curves are usually estimated based on the annual maximum series (AMS) where the maximum daily precipitation data, per year, is collected in order to estimate the probability quantiles associated with a return period.

This dissertation's main purpose is to establish IDF curves of the following type: $i=at^b$, for time periods below 24 hours, as well as for various return periods, using a methodology based on the partial duration series (PDS) in three rain gages located within continental Portugal. The PDS are an alternative to the AMS, due to the fact that the samples used are of extreme values, once compared to a certain defined threshold their values are superior, therefore resulting in shorter periods and enabling us to obtain samples of more reasonable dimensions.

Keeping this in mind, it resorted to an analysis methodology which contains the following steps: collecting hourly precipitation data, filling in existent gaps, analyzing registries and the selection of thresholds, elaborating tests of statistical independence, calculating the probability quantiles and estimating the parameters associated with each IDF curve for its graphical representation.

Hence concluding, once the obtained results were compared to the ones preceding them, that the methodology used develops outcomes which in the majority of both time and return periods appear to be similar to those previously obtained, this grants certain reasonability and makes up a good alternative. Regardless of this, there are still a few cases where disparities can be observed and, given the SDP's and hourly assessment of the registrie's present significance, future improvement in the method and more data for analysis is needed.

Keywords: Exceedances, Partial Duration Series, Threshold, IDF Curves.

Índice do texto

1. Introdução	1
2. Fundamentos teóricos. Modelos aplicados	5
2.1 Considerações iniciais.....	5
2.2 Séries de duração parcial.....	6
2.2.1 Introdução.....	6
2.2.2 SDP como alternativa às SMA.....	6
2.2.3 Constituição das amostras e pressupostos fundamentais.....	10
2.2.4 Seleção do limiar	15
2.2.5 Procedimentos de análise estatística. Teoria de valores extremos e distribuição generalizada de Pareto, GDP	17
2.2.6 Período de retorno estabelecido a partir de SDP.....	26
2.3 Curvas intensidade-duração-frequência e linhas de possibilidade udométrica.	29
2.3.1 Introdução.....	29
2.3.2 Conceitos teóricos	30
2.3.3 Estudos antecedentes em Portugal Continental	31
3. Séries de duração parcial. Curvas de intensidade-duração-frequência.....	37
3.1 Caracterização da precipitação de Portugal Continental.....	37
3.2 Escolha dos postos udométricos e análise de dados.....	38
3.3 Metodologia usada para constituição das amostras.....	41
3.3.1 Preenchimento de falhas de precipitação	42
3.3.2 Obtenção das SDP	50
3.3.3 Verificação da independência amostral das SDP	55
3.4 Modelação estatística das SDP. Estimação de quantis de probabilidade ...	56
3.5 Estimação de curvas intensidade-duração-frequência.....	60
4. Análise e discussão de resultados.....	63
4.1 Introdução	63
4.2 Estudos comparativos da análise.....	63
4.2.1 Considerações breves	63
4.2.2 Metodologia de Pereira <i>et al.</i> (2001).....	63
4.2.3 Metodologia de Correia (2008)	66
4.3 Apresentação e comparação de resultados. Conclusões.....	69
5. Conclusões. Sugestões para prosseguimento do estudo.	77
6. Bibliografia	80

Índice de Figuras

Figura 2.1- Precipitações diárias no posto de S.Julião do Tojal entre 1954/55 e 2010/11.	7
Figura 2.2- Precipitações diárias máximas anuais para os anos hidrológicos entre 1954/55 e 2010/11 no posto de S.Julão do Tojal.	8
Figura 2.3- Amostra SDP para o posto de S.Julião do Tojal com limiar definido $u=20\text{mm}$ e nos anos hidrológicos entre 1954/55 e 2010/2011.....	9
Figura 2.4- Amostra SDP para o posto de S.Julião do Tojal com limiar definido $u=40\text{mm}$ e nos anos hidrológicos entre 1954/55 e 2010/2011.....	9
Figura 2.5- Variação dos coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 em função do limiar, u , para a duração de 1h entre 2001/02 e 2011/12 no posto de S. Julião do Tojal.	12
Figura 2.6- Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 em função do limiar escolhido, u , no posto de S.Julião do Tojal para precipitações com duração de 1h. 13	
Figura 2.7- Representação gráfica do índice de dispersão, em função do limiar, u , com base nas precipitações com duração de 24 horas no posto de S.Julião do Tojal nos anos hidrológicos de 2001/02 a 2011/12.....	15
Figura 2.8– Excedência média, respetivos intervalos de confiança de 95% e número médio de excedências por ano no posto de S.Julião do Tojal para a duração de 1h nos anos hidrológicos entre 2001/02 e 2011/12.....	16
Figura 2.9 - Variação do número médio de excedências em ordem ao limiar, u , para precipitações com duração de 24h no posto de S.Julião do Tojal nos anos hidrológicos de 2001/02 a 2011/12. Critério sugerido por Lang et al. (1999), $\lambda>3$	18
Figura 2.10- Variação da excedência média em ordem ao limiar, u , para precipitações com duração de 24h no posto de S.Julião do Tojal nos anos hidrológicos de 2001/02 a 2011/12. Critério sugerido por Davison & Smith (1990) com representação de um troço linear aproximadamente constante.....	18
Figura 2.11 - Variação dos coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 em ordem ao limiar, u , para precipitações com duração de 24h no posto de S.Julião do Tojal nos anos hidrológicos de 2001/02 a 2011/12. Critério sugerido por Miquel et al. (1984), com representação dos coeficientes dentro dos limites do intervalo de confiança de 95% (embora os limites para cada coeficiente de correlação sejam	

diferentes, os seus valores são muito próximos, pelo que não se faz distinção graficamente, usando apenas os limites do IC para o incremento 2).	18
Figura 2.12- Exemplos adimensionais de "blocos de máximos" ou SMA (à esquerda) e valores acima de um limiar ou SDP (à direita).....	19
Figura 2.13– Comportamento das funções densidade de probabilidade de Fréchet, Weibull e Gumbel respetivamente (adaptado de Gilli, 2006)).....	21
Figura 2.14– Função de probabilidade generalizada de Pareto para os tipos Comum, Exponencial e Pareto I (adaptado de WOLFRAM ALPHA).	25
Figura 2.15- Função densidade de probabilidade generalizada de Pareto para os tipos Comum, Exponencial e Pareto I (adaptado de WOLFRAM ALPHA).....	25
Figura 2.16- Densidades de probabilidade: (Esquerda) GPD (Beta) e GEV (Weibull), contínua, ambas com parâmetro $\xi=-0.3$. (Direita) GPD (Pareto II) e GEV (Fréchet) com parâmetros $\xi=1$, $\mu=-0.25$ e $\sigma=1/\pi$	26
Figura 2.17- Isolinhas da relação entre precipitações com o mesmo período de retorno e durações de a)12 e 24h, b)3 e 6h e c)0.5 e 1h (adaptado de LNEC, 1976)	32
Figura 2.18- Percentagem dos máximos em 60min e 6h em função dos totais diários para um período de retorno de 1000 anos (adaptado de Godinho, (1989)).	32
Figura 2.19- Regiões pluviométricas e parâmetros das curvas IDF propostas por Matos e Silva (1986) (adaptado de Portela, (2006)).....	35
Figura 3.1- Precipitação anual média em Portugal Continental. Os pontos representam as 144 estações udométricas utilizadas (adaptado de Santos et al., (2010)).....	37
Figura 3.2- Localização esquemática dos postos udométricos, destacando-se, a vermelho, os escolhidos para análise.....	39
Figura 3.3- Esquema de udómetro do tipo basculante	40
Figura 3.4- Posto de S.Julião do Tojal. Udograma referente a Novembro de 1967, obtido num udógrafo de sifão (adaptado de Lencastre, (1984))	40
Figura 3.5- Curvas que, em função da dimensão da amostra, N, e do nível de significância, α , fornecem os valores mínimos dos coeficientes de correlação que permitem rejeitar a hipótese de tal coeficiente não ser diferente de zero (adaptado de Yevjevich, (1972)).....	48
Figura 3.6– Precipitações horárias nos postos de S.Julião do Tojal e de Caneças, no mês de Abril do ano hidrológico de 2006/07. Equação de regressão linear simples e respetivo coeficiente de determinação, R^2	49

Figura 3.7- Execução do programa de cálculo automático para vários limiares no posto de S.Julião do Tojal para precipitações com duração de 24h.	52
Figura 3.8- Escolha do limiar num trecho aproximadamente linear constante ($u=15\text{mm}$) para o posto de S.Julião do Tojal e duração de precipitação de 24h.	54
Figura 3.9- Execução do programa de cálculo automático para o limiar selecionado ($u=15\text{mm}$) para o posto de S.Julião do Tojal e duração de precipitação de 24h.....	54
Figura 3.10- Estimação de máximos anuais de variáveis hidrológicas aleatórias (adaptado de Portela et al.,2012)	57
Figura 3.11- Esquema simplificado da metodologia adotada para o a estimação de quantis de probabilidade das SDP, com períodos de retorno relativos a máximos anuais.....	59
Figura 3.12– Posto de Abrantes. Correlação de valores de intensidade e duração após a aplicação do operador logarítmico para um período de retorno de 5 anos.....	62
Figura 4.1- Mapa de isolinhas de precipitação obtido por Pereira et al., (2001), para a duração de 6h.....	64
Figura 4.2- Localização dos 453 postos com mais de 20 anos de registos de precipitação diária. (retirado de Correia, Portela, & Morais, (2010)).....	67
Figura 4.3- Curvas IDF obtidas para o posto de Abrantes para os diferentes períodos de retorno e curvas antecedentes de Correia (2008).	71
Figura 4.4- Curvas IDF obtidas para o posto de Monchique para os diferentes períodos de retorno e curvas antecedentes de Pereira et al. (2001) e Correia (2008).....	73
Figura 4.5- Curvas IDF obtidas para o posto de S.Julião do Tojal para os diferentes períodos de retorno e curvas antecedentes de Pereira et al. (2001) e Correia (2008).	75

Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Distribuição e caracterização do valor do índice de dispersão (adaptado de WIKIPÉDIA).....	14
Tabela 2.2- Relações entre os valores máximos para durações inferiores a 60 min e de 60 min (extraído de Godinho, (1984)).....	32
Tabela 2.3- Parâmetros a e n da linha de possibilidade udométrica proposta por Azevedo (1953) para a região de Lisboa (Portela, 2006).	33

Tabela 2.4- Tempos de retorno e respetivas linhas de possibilidade udométrica para os postos estudados por Lencastre e Franco (1984) (adaptado de Portela, (2006)).	34
Tabela 3.1- Características geográficas dos postos udométricos selecionados para a análise SDP.....	41
Tabela 3.2- Características das precipitações horárias nos postos selecionados para análise e períodos de registos.....	41
Tabela 3.3- Dados de precipitação horária nos postos selecionados. Falhas existentes, períodos de análise e percentagens daquelas falhas nas amostras finais.....	42
Tabela 3.4- Períodos com registos e efetivamente adotados na análise (* no posto de Abrantes não se considerou o ano hidrológico 2009/10 por não ser adequado o preenchimentos de falhas com os critérios usados).....	42
Tabela 3.5- Posto udométrico de S.Julião do Tojal. Precipitações horárias de 1 a 15 de Setembro de 2006. A amarelo destaca-se o dia em que as seis falhas nas precipitações horárias foram preenchidas com precipitação nula.	43
Tabela 3.6- Posto de Abrantes. Precipitações horárias nos meses de Setembro e Outubro dos anos hidrológicos de 2006/07 e 2007/08, respetivamente. A amarelo destacam-se os dias em que as falhas nas precipitações horárias foram preenchidas com precipitação nula.....	44
Tabela 3.7- Postos de Gavião e Constância. Precipitações horárias e diárias nos dias 28, 29 e 30 de Setembro do ano hidrológico de 2006/07.	44
Tabela 3.8- Postos de Gavião e Constância. Precipitações horárias e diárias no mês de Outubro do ano hidrológico de 2007/08.....	45
Tabela 3.9- Posto de Monchique. Preenchimento de falhas horárias por recurso à interpolação linear. A amarelo encontram-se destacados os valores obtidos por interpolação.....	46
Tabela 3.10- Dados da correlação e teste de hipóteses proposto por Yevjevich (1972) para as precipitações horárias no posto de S.Julião do Tojal e o posto vizinho de Caneças no mês de Abril do ano hidrológico de 2006/07.	49
Tabela 3.11- Critérios adotados para o preenchimento das falhas nos três postos udométricos utilizados no estudo (a referência a análise de regressão 1 e 2 tem a ver com o facto de se referirem a períodos distintos).....	50
Tabela 3.12- Resultados devolvidos pelo programa de cálculo automático para o posto de S.Julião do Tojal e duração de precipitação de 24h.	53

Tabela 3.13- Amostra obtida para o limiar de $u=15\text{mm}$ no posto de S.Julião do Tojal e duração da precipitação de 24h.	55
Tabela 3.14– Características da amostra relativa ao limiar escolhido de $u=15\text{mm}$ no posto de S.Julião do Tojal para a duração da precipitação de 24h.	55
Tabela 3.15- Limiares escolhidos para os postos udométricos em estudo e respetivas durações. (Nota: "C" representa trecho linear constante, "D" descendente e "A" ascendente).....	56
Tabela 3.16- Limites do intervalo de confiança de 95% dos coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para diferentes dimensões de amostra.	57
Tabela 3.17- Teste de independência estatística das SDP. A coluna "Teste de Independência" afere se os valores dos coeficientes de autocorrelação se incluem dentro dos limites inferiores e superiores.	58
Tabela 3.18- Quantis de probabilidade, x , para diferentes períodos de retorno estimados com base nas SDP no posto de Abrantes.....	60
Tabela 3.19- Posto de Abrantes. Aplicação do operador logarítmico para as intensidades de precipitação obtidas da análise estatística das SDP, para o período de retorno de 5 anos.	61
Tabela 3.20- Parâmetros das curvas IDF para intensidade da precipitação expressa em mm/h duração da precipitação em min, obtidas com a metodologia adotada, baseada em SDP, para os diferentes períodos de retorno nos postos udométricos em estudo.....	62
Tabela 4.1- Rede udométrica analisada por Pereira et al. (2001).	64
Tabela 4.2- Parâmetros das curvas IDF obtidas por Correia (2008) para os postos udométricos analisados.....	70
Tabela 4.3- Parâmetros das curvas IDF obtidas por Pereira et al., (2001) para os postos udométricos analisados.	70
Tabela B4 - Quantis de probabilidade, x , para diferentes períodos de retorno estimados com base nas SDP no posto de Abrantes.....	89
Tabela B5 - Quantis de probabilidade, x , para diferentes períodos de retorno estimados com base nas SDP no posto de Monchique.	90
Tabela B6 - Quantis de probabilidade, x , para diferentes períodos de retorno estimados com base nas SDP no posto de S.Julião do Tojal.	91
Tabela C7 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Abrantes, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): a) 1h, b) 2h, c) 4h,	

d) 6h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.....	94
Tabela C8 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Abrantes, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): e) 8h, f) 10h, g) 12h, h) 18h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.....	95
Tabela C9 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Abrantes (à esquerda) para a duração de 24h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar na figura.....	96
Tabela C10 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Monchique, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): a) 1h, b) 2h, c) 4h, d) 6h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.....	98
Tabela C11 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Monchique, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): e) 8h, f) 10h, g) 12h, h) 18h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.....	99
Tabela C12 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Monchique (à esquerda) para a duração de 24h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar na figura.....	100
Tabela C13 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de S.Julião do Tojal, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): a) 1h,	

b) 2h, c) 4h, d) 6h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras..... 102

Tabela C14 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de S.Julião do Tojal, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): e) 8h, f) 10h, g) 12h, h) 18h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras..... 103

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ϕ^{-1}	Função inversa da distribuição Normal
ϕ	Função distribuição de probabilidade da lei Normal
$F_a(x)$	Função de distribuição de probabilidades para máximos anuais
$F_u(y)$	Função de distribuição condicional
H	Família de funções de convergência deduzidas da <i>GEV</i>
$H_u(x)$	Função de distribuição de probabilidades da série de duração parcial
S_Z^2	Variância da variável aleatória $Z = X - u$
T_a	Período de retorno anual
T_p	Período de retorno parcial
X_{DPi}	Valor da variável aleatória hidrológica no contexto das SDP
$\overline{X_{DP} - u}$	Varição da excedência média acima do limiar u
r_k	Valor dos limites do intervalo de confiança para um dado coeficiente de autocorrelação k .
t, t_p	Duração da precipitação
x_F	Limite superior do domínio da distribuição F
$\Psi_\alpha(x)$	Função de distribuição de Weibull
$\hat{\xi}$	Estimativa do parâmetro de forma
$\hat{\sigma}$	Estimativa do parâmetro de escala
χ^2	Distribuição do Qui-quadrado
$\phi_\alpha(x)$	Função de distribuição de Fréchet
a, b	Parâmetros das curvas IDF
<i>EVT</i> ou	Teoria dos valores extremos
<i>TVE</i>	
<i>GEV</i>	Distribuição Generalizada de valores extremos
<i>GPD</i>	Distribuição Generalizada de Pareto
$h(y)$	Função de densidade de probabilidade
i	Intensidade de precipitação
<i>IDF</i>	Curva de intensidade-duração-frequência
<i>INAG</i>	Instituto da Água
<i>MA</i>	Máximos anuais
<i>NERC</i>	<i>Natural Environment Research Council</i>

<i>SDP ou PDS</i>	Séries de duração parcial
<i>POT</i>	Método de análise de valores extremos Peaks-over-threshold
<i>SMA</i>	Séries de Máximos Anuais
<i>SNIRH</i>	Sistema Nacional de Recursos Hídricos
$COV(X_i, Y_i)$	Covariância das variáveis aleatórias X e Y
$E(X)$	Valor esperado de uma variável aleatória
<i>ID</i>	Estatística de Fisher ou índice de dispersão
<i>MOM</i>	Método dos momentos
<i>N</i>	Número de elementos de uma amostra
<i>P</i>	Valor da precipitação
<i>T</i>	Período de retorno
a', n'	Parâmetros das curvas IDF obtidas por Matos (1986)
<i>k</i>	Incremento do coeficiente de autocorrelação
<i>u</i>	Limiar genérico
$\Lambda(x)$	Função de distribuição de Gumbel
α	Nível de significância do intervalo de confiança
λ	Número anual médio de excedências face ao limiar u
μ	Parâmetro de posição
ξ	Parâmetro de forma
$\rho_{X,Y,k}$	Coeficiente de autocorrelação de incremento entre os conjuntos X e Y
i.i.d	Variável independente e identicamente distribuída
ρ	Coeficiente de correlação da população de dimensão N
X	Variável aleatória
x	Valor da variável aleatória X
σ	Parâmetro de escala
σ_{X_i}	Desvio padrão da variável aleatória X

1. Introdução

Desde tempos imemoriais que o Homem quis explicar aquilo que hoje comumente se designa por “fenómenos naturais”. Essa busca incessante pelo esclarecimento e previsão do que a Natureza provoca sempre desafiou inúmeras mentes e originou as mais diversas teorias, tendo como um dos objetivos primordiais a conceção de estruturas que, servindo o Homem, tivessem em conta tais fenómenos. Um desses acontecimentos é a chuva, que em determinadas condições pode ser vista como um fenómeno perigoso – casos de má ocupação do território e, conseqüente mau planeamento urbano, assim como de erros de conceção e fraca manutenção dos equipamentos de drenagem em situação de cheias são alguns exemplos – e que tem também por isso um papel relevante.

Neste trabalho pretende-se analisar com recurso a métodos matemáticos e estatísticos, os acontecimentos pluviosos independentes que servem de base a estudos para a conceção de sistemas de recursos hídricos (tais como pontes, barragens, diques, açudes ou canais) em Portugal Continental, na maior parte das ocorrências, em consequência das cheias que originam. Tais estudos exigem, por norma, uma definição extensa do modo como probabilisticamente os acontecimentos hidrológicos e meteorológicos extremos se comportam, e são geralmente condicionados por uma baixa representatividade da informação que incorporam, pois a insuficiência de registos leva a amostras com reduzida dimensão. Esta limitação é tanto mais importante quanto as estimativas pretendidas estão, por norma, associadas a elevados períodos de retorno, o que implicaria que a sua caracterização se apoiasse em amostras longas para que os resultados assim obtidos tivessem conteúdo significativo.

No âmbito do tratamento estatístico de variáveis hidrológicas, aplica-se por norma a técnica das séries de máximos anuais, SMA, a qual, no âmbito das precipitações intensas tem normalmente por base amostras de precipitações diárias máximas anuais, isto é, amostras constituídas pelo mais elevado de precipitação diária (período das 9:00 h às 9:00 h) que ocorre em cada ano hidrológico.

Têm-se, portanto, amostras com um valor por ano – o valor máximo – e por isso com dimensão igual ao número de anos com registos, as quais são, então, objeto de análise, por regra, de índole estatística. A limitação à incorporação nas amostras de um único valor por ano pode comprometer desde logo o recurso à técnica SMA e a sua conseqüente aplicação, pois para que a amostra possa conferir à análise estatística uma maior precisão é essencial que seja constituída por muitos anos de registos, o que no caso de Portugal Continental nem sempre acontece, designadamente, se estiverem em causa precipitações com duração inferior ao dia.

Por outro lado, quando se dispõe de medições contínuas, a utilização de séries de máximos anuais pode limitar os dados incorporados na análise, pois não considera valores que, sendo também extremos, são inferiores ao valor máximo do ano em que ocorreram, não obstante superarem os máximos anuais de outros anos. Adicionalmente, podem ser incorporados na amostra valores máximos anuais inferiores a valores que, não sendo máximos noutros anos, não foram selecionados. (Silva, Portela, & Naghettini, 2012)

De modo a contornar as críticas apontadas às séries de máximos anuais, SMA, surge como alternativa o método das Séries de Duração Parcial, SDP (na literatura inglesa, *partial duration series*, *PDS*, ou *peaks-over-threshold*, *POT*), que assenta no estudo de valores máximos de precipitação que estejam acima de um determinado limiar ou *threshold* previamente definido, permitindo, assim, que a amostra tenha mais do que um valor por ano, ao contrário do que acontece nas SMA. Através da técnica SDP confere-se um significado maior à inferência estatística pelo facto de se ter uma série com maior número de valores igualmente representativos de extremos, dando-se, assim, resposta ao problema da falta ou da insuficiência de dados.

Embora, numa primeira apreciação, a técnica das SDP possa prometer bastante, a sua aplicação envolve ainda alguma subjetividade, sendo que o estado de arte sobre o tema ainda não fornece regras universais e evidentes para a escolha do limiar de modo a, por um lado, garantir a independência estatística entre as excedências ao longo do tempo e, por outro, incorporar a maior quantidade possível de informação. É, por isso, necessário prosseguir com os estudos sobre o assunto de modo a tornar esta técnica menos subjetiva e mais robusta e fidedigna.

A investigação efetuada teve por objetivo validar a aplicação da técnica das SDP na formulação das designadas curvas intensidade-duração-frequência (curvas IDF) com uma metodologia expedita, por permitir a constituição de amostras representativas de precipitações extremas subdiárias compatíveis com o subsequente tratamento estatístico requerido pelo estabelecimento daquelas curvas. Os resultados assim obtidos foram comparados com os propostos por outros autores.

As curvas intensidade-duração-frequência relacionam a intensidade da precipitação excecional com dado período de retorno com a respetiva duração sendo um instrumento de cálculo fundamental na análise de cheias e, conseqüentemente, do dimensionamento hidrológico. (Pereira, Rodrigues, & Costa, 2001). A relação entre a precipitação intensa (e não a sua intensidade) e a duração dessa precipitação, também para período de retorno fixo, designa-se por linha de possibilidade udométrica, havendo uma total equivalência entre esta linha e a correspondente IDF.

Identificado o objetivo da investigação levada a cabo, indica-se a organização do texto que a documenta. Assim, para além deste capítulo introdutório, a presente dissertação contém mais quatro capítulos.

No segundo capítulo são abordados os conceitos teóricos e respetivas demonstrações que estão na base da metodologia relativa ao âmbito da dissertação. São, assim, tratados conceitos como a Teoria dos Valores Extremos, TVE, que permite lidar com valores extremos de variáveis aleatórias (nas aplicações efectuadas, precipitações extremas). São também apresentados conceitos matemáticos e estatísticos, como a transformação de Fisher para a estimativa de coeficientes de correlação e a função de distribuição de probabilidade de Pareto que condicionalmente é transformada em Exponencial no caso das SDP para a modelação da magnitude das excedências acima dos limiares.

Uma vez que a análise do tema utilizou casos de estudo concretos, foi necessário identificar os postos udométricos em que a informação de base para o efeito necessária estivesse disponível e que, desejavelmente, permitissem a comparação com resultados antecedentes baseados na técnica das SMA. Deste modo, no terceiro capítulo são analisados os registos recolhidos de precipitações horárias

em postos udométricos com curvas IDF já estabelecidas. Menciona-se, ainda, o tratamento a que se sujeitaram tais registos tendo em vista o preenchimento das falhas por eles exibidas, para o que foram aplicados critérios matemáticos mencionados em aplicações equivalentes, como seja a interpolação linear e a correlação com registos de postos vizinhos, de modo a se dispor de amostras temporalmente contínuas tão longas quanto possível. São também tecidas considerações teóricas sobre a escolha dos postos, tratamento matemático das amostras e organização dos dados. Refere-se ainda o programa de cálculo automático aplicado para a constituição das SDP, o qual permite a seleção do *threshold* adequado às várias durações de precipitações, tendo em conta a necessidade de garantir que as amostras das excedências constituem variáveis aleatórias, como tal, independentes entre si. Uma vez escolhido o limiar, tecidas as devidas considerações teóricas e constituída a amostra dos “picos” representativos de precipitações extremas com uma dada duração, em cada posto udométrico estudado, o capítulo prossegue com tratamento estatístico dessa amostra, incluindo a confirmação da sua independência estatística para um dado intervalo de confiança, e com a estimativa, para vários períodos de retorno definidos, das correspondentes precipitações extremas.

No quarto capítulo é feita referência a dois estudos antecedentes cujos resultados são comparados com os decorrentes da metodologia usada no âmbito da dissertação.

Por fim, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões retiradas da investigação efetuada e são feitas sugestões de investigações futuras no âmbito em que a mesma se insere.

2. Fundamentos teóricos. Modelos aplicados

2.1 Considerações iniciais

Muitas construções são fortemente influenciadas na sua concepção por diversos fatores onde se destaca naturalmente a precipitação. As características das precipitações devem por esse motivo ser conhecidas para cada local sendo que a duração, intensidade e frequência das mesmas os aspetos lhes estão associados e que na área da Hidrologia se relacionam mediante curvas IDF.

O estabelecimento destas curvas no caso de Portugal Continental é algo que tem a sua origem nos anos 80 e que até hoje está envolvido em alguma subjetividade sobretudo no que respeita aos critérios usados e nas características das amostras objeto na análise.

Com o propósito de averiguar a adequabilidade de um novo método que nos permita superar algumas das limitações dos que tem sido usados até então para a formulação das curvas de intensidade-duração frequência, pretende-se neste capítulo abordar os conceitos que estão na base da metodologia proposta que tem.

Como mencionado no capítulo 1, a presente investigação teve por objetivo averiguar uma ferramenta alternativa que, de algum modo, permitisse caracterizar as precipitações intensas de curta duração, designadamente, inferior ao dia. Com efeito, não obstante serem estas as precipitações que, por regra, intervêm na análise de cheia em Portugal Continental, são escassos os registos referentes às mesmas, não só em termos do número de amostras disponíveis, mas muito pertinentemente das dimensões dessas amostras.

A ferramenta alternativa envolveu, no essencial, um procedimento de amostragem das precipitações intensas de curta duração distinto do habitual e que permite utilizar mais amplamente a informação contida nas amostras disponíveis dessas precipitações, através das chamadas séries de duração parcial, SDP.

Assim, apresentam-se, neste capítulo, os conceitos relacionados com as SDP, compreendendo, entre outros aspetos, o modo de constituição das respetivas amostras, o seu tratamento estatístico e como a informação que fornecem se relaciona com a que decorre da análise convencional, baseado em séries de máximos anuais.

Tendo em conta que a análise de cheias requer o conhecimento das precipitações intensas, em termos da sua duração, intensidade e frequência sendo que tais características se relacionam através das designadas linhas de possibilidade udométrica ou de curvas intensidade-duração-frequência, curvas IDF, incluíram-se no capítulo conceitos relacionados com esta temática, com ênfase para estudos antecedentes sobre a mesma.

2.2 Séries de duração parcial

2.2.1 Introdução

Pretende-se, neste capítulo, abordar teoricamente a técnica das séries de duração parcial, SDP, num contexto matemático e sobretudo hidrológico. Dado que os seus princípios estão na base do método usado neste trabalho, importa também fazer um enquadramento histórico, referir quais as suas potencialidades, assim como justificar a razão da sua pouca utilização na estimativa de quantis de probabilidade de precipitações extremas. Para uma melhor compreensão, serão incluídos exemplos ilustrativos do uso desta técnica, assim como uma referência ao estado de arte sobre esta temática.

Deste modo, começa-se este por clarificar os conceitos teóricos que estão na base desta ferramenta de análise hidrológica, tendo como ponto de partida uma abordagem comparativa com as séries de máximos anuais, onde se fará também um enquadramento histórico dessa metodologia. Seguidamente, explicar-se-á no que consistem as séries de duração parcial na sua formulação teórica, incidindo nos critérios que validam a sua aplicação. Serão revistos conceitos de independência estatística, processos de Poisson e estatística de Fisher, funções de distribuição de probabilidade de Pareto e Exponencial para a modelação da magnitude dos “picos” acima de um certo limiar, e critérios de seleção de limiares para cada amostra.

De seguida será feita uma contextualização histórica da técnica das SDP onde serão referidos os estudos mais relevantes feitos sobre esta temática.

Com o objetivo de esclarecer melhor com um exemplo, o capítulo será acompanhado de aplicações práticas do uso das SDP aos registos de precipitações subdiárias no posto de São Julião do Tojal, nos anos hidrológicos de 2001/2002 a 2011/2012.

2.2.2 SDP como alternativa às SMA

A análise da frequência de valores extremos de variáveis hidrológicas pode ser alcançada com recurso a valores máximos anuais (SMA) ou a valores acima de um dado limiar (SDP). Especificamente no caso em análise, referentes a precipitações extremas com dada duração, as SMA são constituídas por um valor por ano, a máxima precipitação nesse ano com essa duração, enquanto as SDP incluem todos os em “picos” daquela precipitação acima de um valor de limiar previamente definido (Mkhandi, Opere, & Willems, 2005).

Desde logo, a mais frequente omissão das SMA diz respeito à não consideração de outros valores extremos inferiores ao máximo de um dado ano, mesmo quando esses valores são superiores a outros máximos anuais - circunstância que restringe a amostra, retirando da mesma valores úteis que, apenas por não serem máximos no respetivo ano, são rejeitados.

Outra lacuna evidenciada por esta metodologia é que, excluindo valores extremos que podem suceder frequentemente num dado ano, pode incluir, por outro lado, valores máximos reduzidos que irão,

consequentemente, resultar em amostras com valores menores e, deste modo, comprometer os resultados da análise, por conduzir a menores estimativas.

Aponta-se também a esta técnica o facto de, por apenas retirar um valor da variável em estudo por ano analisado, necessitar de um longo período de análise, sendo que em muitos casos não existem dados. Isto torna a inferência estatística menos fidedigna por se estar na presença de amostras com dimensão reduzida, facto que assume especial relevância quando é necessário estimar variáveis hidrológicas com períodos de retorno maiores, ou seja bastante superiores à extensão da amostra em estudo.

Posto isto, verifica-se que para o uso preciso desta ferramenta há uma necessidade grande de se dispor ao longo de vários anos de registos contínuos de precipitação a uma dada escala temporal (diária ou subdiária) nos postos udométricos de Portugal Continental, algo que tem sido feito com alguma descontinuidade por indisponibilidade de meios de natureza técnica e económica.

As SMA apesar de mais comumente usadas levantam algumas objeções que justificam a pertinência de um método de análise que, embora possa não ser universal e robusto, se constitui como uma outra opção. Na Figura 2.1 apresentam-se, como exemplo, as precipitações diárias no posto de S.Julião do Tojal nos anos hidrológicos de 1955/56 a 2013/14 que servem de base à análise de SMA e na Figura 2.2, as correspondentes precipitações máximas anuais.

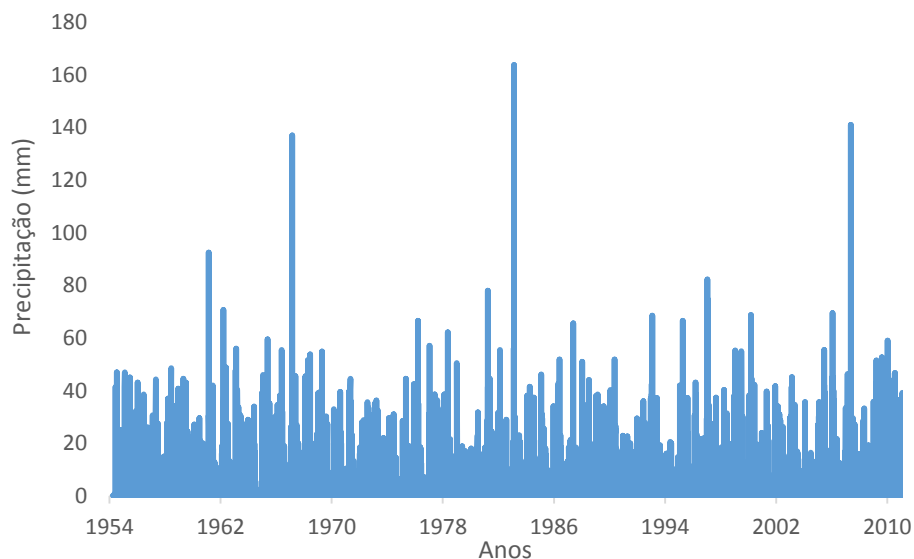


Figura 2.1- Precipitações diárias no posto de S.Julião do Tojal entre 1954/55 e 2010/11.

Como alternativa, a técnica denominada por séries de duração parcial (SDP), ou na literatura inglesa *peaks-over-threshold (POT)*, consiste na análise de frequência aplicada a séries de “picos” que excedam um determinado valor limiar, ou *threshold*, não estando as amostras assim constituídas limitadas a um elemento por ano. Deste modo, a abordagem SDP tem a vantagem de permitir uma seleção mais ampla e representativa dos acontecimentos hidrológicos excecionais (Silva *et al.*, 2012).

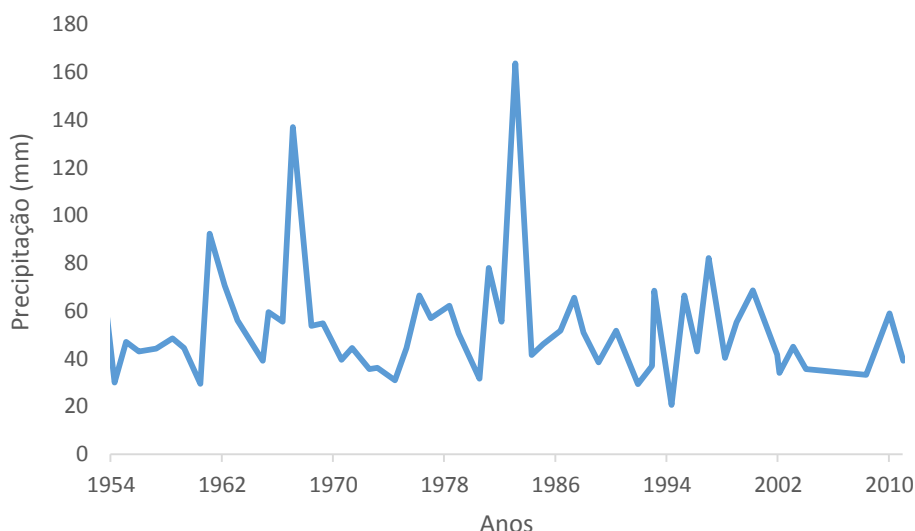


Figura 2.2- Precipitações diárias máximas anuais para os anos hidrológicos entre 1954/55 e 2010/11 no posto de S. Julião do Tojal.

O método permite um uso mais eficiente dos dados de base, isolando os eventos de chuvas superiores a uma determinada precipitação de referência, que na análise de precipitações extremas, apresentam uma maior relevância estatística. Por conseguinte, são rejeitados valores baixos como as precipitações máximas de valor reduzido, que poderiam comprometer o comportamento da amostra analisada e portanto consegue-se um estudo mais fidedigno da informação disponível.

Apesar de auspiciosa, a técnica das SDP apresenta alguns inconvenientes que fazem com que a mesma seja muito menos aplicada em estudos hidrológicos do que as SMA.

Em primeiro lugar, os “picos” consecutivos devem ser independentes e, portanto, devem ser definidos alguns critérios de verificação de independência para identificar os eventos. Por exemplo, no caso de múltiplos “picos” correspondentes ao mesmo evento hidrológico, apenas o maior pico deve ser incluído nas SDP. Segundo, o método envolve a seleção de um limiar apropriado, isto é, que garanta tanto quanto possível a inclusão de informação relevante para a análise, sem violar os critérios básicos de inferência estatística (Madsen, Rasmussen, & Rosbjerg, 1997). Estes critérios estão envolvidos numa grande complexidade analítica que tem justificado o seu pouco uso. Nas Figuras 2.3 e 2.4 ilustra-se a seleção de “picos” acima de um limiar, u , definido por $u=20$ mm e $u=40$ mm respetivamente, para precipitações diárias observadas no posto de Julião do Tojal dos anos hidrológicos de 1955/55 a 2010/11.

Em termos históricos, refere-se que a técnica das séries de duração parcial foi proposta como uma alternativa à técnica de séries de máximos anuais, no âmbito da análise de frequências de eventos pluviosos como já foi referido anteriormente. Segue-se uma menção breve a estudos pioneiros feitos no campo das SDP, elaborada tendo por base o trabalho de Öñöz & Bayazit (2001). Alguns dos conceitos que surgem no texto serão retomados em detalhe nos capítulos subsequentes.

Langbein (1949) refere que um dos argumentos usados para o uso deste método é o facto de reunir mais informação quando comparado com as SMA. O mesmo autor afirma que além disso, as SDP tem

uma maior relevância física por se basearem em modelos de distribuição de excedências anuais de acontecimentos pluviosos e respectivas excedências.

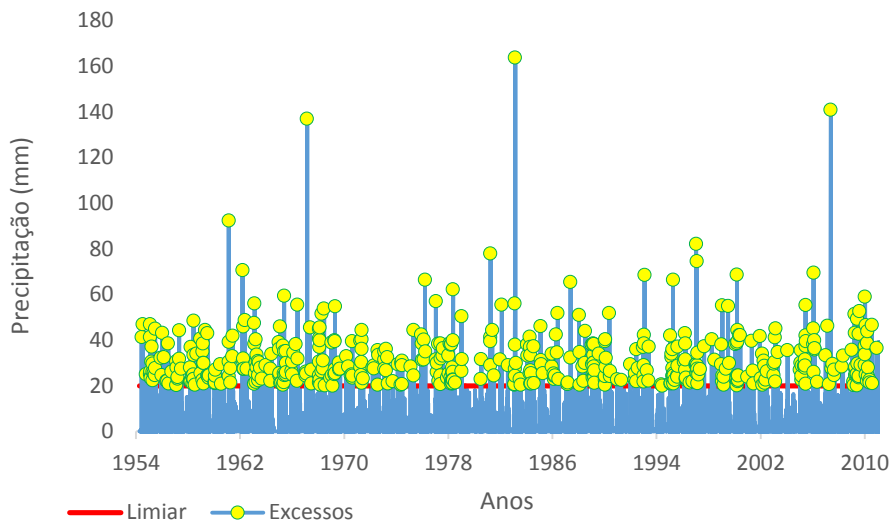


Figura 2.3- Amostra SDP para o posto de S.Julião do Tojal com limiar definido $u=20\text{mm}$ e nos anos hidrológicos entre 1954/55 e 2010/2011.

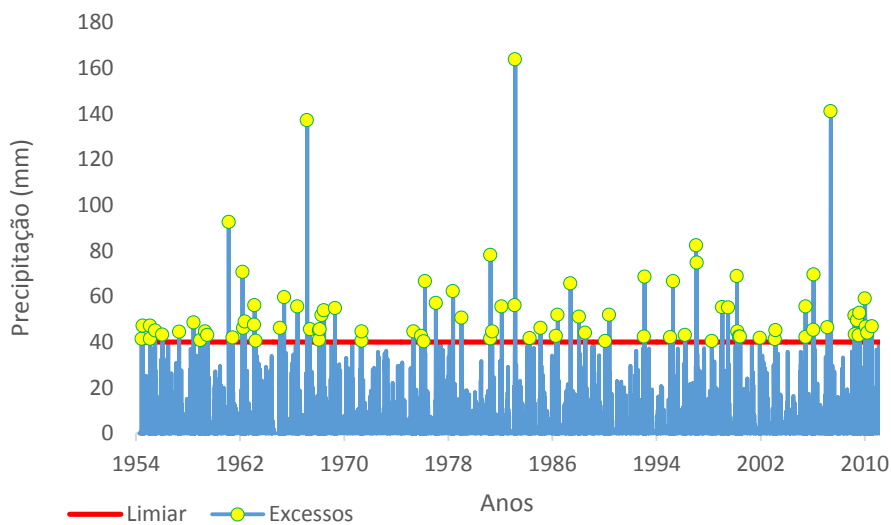


Figura 2.4- Amostra SDP para o posto de S.Julião do Tojal com limiar definido $u=40\text{mm}$ e nos anos hidrológicos entre 1954/55 e 2010/2011.

Shane & Lynn (1964) assumem que os tempos de ocorrências dos picos acima de um dado limiar seguem um processo de Poisson e que as suas magnitudes seguem uma distribuição exponencial. Mais tarde, Kirby (1969) demonstrou que o processo de Poisson seguido pelos valores extremos era justificado por uma forma limitante dos intervalos espaçados aleatoriamente entre processos de Bernoulli ser suficientemente pequeno para pequenas probabilidades de excedência.

Zelenhasic (1970) considera dois parâmetros da distribuição gama para definir o comportamento das magnitudes das excedências, e refere a distribuição exponencial como dos seus casos particulares e

que melhor se adequa. No mesmo estudo, assume-se distribuições de máximos anuais modelados por processos de Poisson para a frequência e uma distribuição gama particularizada na distribuição exponencial, no caso das magnitudes dos eventos. Ao analisar os resultados concluiu que os parâmetros da distribuição gama se ajustavam melhor aos máximos anuais quando os mesmos eram estimados por séries de duração parcial.

Taesombut (1978) comparara distribuições para as frequências anuais e magnitude das excedências obtendo expressões para a combinação de modelos de Poisson e exponenciais. No mesmo estudo é feita uma investigação empírica da eficiência da estimação de extremos com recurso a SMA e SDP, tendo-se verificado que as estimativas de picos anuais para um dado período de retorno recorrendo a SDP tinham uma variância amostral menor quando comparadas com recurso a SMA. Depois Cunnane (1973) constatou isso teoricamente no caso de as SDP terem pelo menos e em média 1.65 excedências por ano recorrendo a 17 amostras de SDP nos EUA, e concluiu que os processos de Poisson ou combinados de Poisson se ajustavam para a distribuição das frequências de máximos anuais enquanto a distribuição exponencial ou combinada de exponencial se modelava melhor no caso das distribuições de frequência das magnitudes das excedências.

Rosbjerg, Madsen, & Rasmussen (1992) e Madsen *et al.* (1997) mostraram que a distribuição generalizada de valores extremos, GEV (do inglês *generalized extreme value*), obtida para eventos anuais modelados por um processo de Poisson para a ocorrência de excedências era combinada com a distribuição generalizada de Pareto no caso da magnitude das mesmas.

Mais recentemente Lang, Ouarda, & Bobée (1999) fizeram uma revisão do estado de arte da modelação de SDP onde são discutidas questões como a seleção do limiar, modelos para os processos de ocorrência de extremos e distribuição das suas magnitudes, assim com a correspondência entre as distribuições no caso das SMA e SDP. Nestes trabalhos concluiu-se que as principais dificuldades alusivas às SDP estão relacionadas com a seleção do limiar e o processo de ocorrência dos eventos pluviosos.

2.2.3 Constituição das amostras e pressupostos fundamentais

Feito o seu enquadramento e referidas as dificuldades de análise em que assenta o método das séries de duração parcial, importa estar na presença de amostras fidedignas e que estatisticamente não apresentem uma tendência com base em dados temporalmente próximos, ou que revelem uma pouca representatividade do fenómeno.

Para a avaliação da frequência de variáveis aleatórias com recursos as séries de duração parcial começa-se por seleccionar de uma série hidrológica temporalmente continua $X_t, t \in [t_0, t_n]$ todos os valores X_{DP} , que excedam um limiar pré-definido, ou *threshold*, u , sendo que no formalismo matemático temos na amostra o i -ésimo valor dado por :

$$\{X_{DP} i\} = \max \{X_t | X_t > u\}_{t=t_0+t_i}^{t=t_0+t_i+\Delta t} \quad (1)$$

sendo $[t_0 + t_i, t_0 + t_i + \Delta t]$ o intervalo de tempo da amostra.

Está-se, portanto, na presença de amostras que não se limitam a incluir um valor por ano, o que lhes confere maior representatividade.

Os valores extremos acima do limiar que são retirados com recurso a SDP, podem ser modelados através de um processo estocástico bivariado que pode ser descrito por:

$$\{T_i, X_{DPi}\}_{i=1}^M \quad (2)$$

em que T_i representam os tempos de ocorrência das excedências, X_{DPi} o valor das excedências, e M o número total de ocorrências.

Para assim podermos descrever este processo os pressupostos seguintes devem ser comprovados (Silva *et al.*, 2012): o número de excedências num dado intervalo de tempo compreendido em $[t_0, t_n]$ é uma variável aleatória discreta que segue a distribuição de Poisson com parâmetro λ e as excedências X_{DP} são variáveis aleatórias independentes, com uma distribuição de probabilidade $H(x)$.

Sendo um processo estocástico um conjunto de variáveis aleatórias indexadas no tempo cujo comportamento não é determinístico, na medida em que um dado acontecimento não determina o seu posterior, justifica-se o uso dos dois pressupostos atrás referidos para a constituição das amostras de SDP pela total imprevisibilidade dos valores que as variáveis podem tomar.

Como já foi referido é fundamental garantir que a amostra é constituída por acontecimentos independentes entre si, quer para uma análise estatística rigorosa, para a verificação de hipótese de Poisson de parâmetro λ . A seleção de um critério de independência constitui um problema complexo, especialmente se se considerar a dificuldade associada ao uso de argumentos físicos que definam a dependência entre dois eventos (Lang *et al.*, 1999), sendo que este facto pode ter condicionado, em parte, o uso da técnica das SDP e lhe ter atribuído uma maior complexidade analítica.

De entre os critérios de independência estudados no âmbito dos acontecimentos pluviosos destacam-se a revisão bibliográfica feita por Lang *et al.* (1999) sobre a modelação estatística de extremos com base em SDP, aplicável a séries de escoamentos. No mesmo estudo, são referidos alguns critérios aplicáveis a séries de escoamentos com o objetivo de selecionar acontecimentos de cheia intercalados por períodos de recessão suficientemente pronunciados para que seja válido considerar que provêm de acontecimentos de precipitação distintos (Silva *et al.*, 2012).

No caso de a amostra ser constituída por valores de precipitação num dado posto udométrico, é geralmente aceite como critério que os extremos retirados acima de um dado limiar definido estejam espaçados de períodos de tempo onde não haja ocorrência de chuva, conferindo-se, assim, independência estatística aos acontecimentos pluviosos. No presente trabalho foi imposta a condição de haver pelo menos um período de 24 h sem precipitação entre dois picos acima de um dado limiar, para que esses extremos fossem integrados na amostra de SDP.

Neste contexto, Miquel, Chambolle, & Bernier (1984) referem que não deve haver um valor mínimo definido para o intervalo de tempo entre acontecimentos pluviosos, e propõe para testar a independência estatística o uso dos coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 dos valores considerados na amostra, sendo que no caso de os mesmos serem diferentes de zero com alguma significância, isso revela a existência de correlação estatística e por conseguinte deve rejeitar-se a amostra.

A própria definição de coeficiente de autocorrelação justifica o seu uso neste âmbito. Trata-se de uma medida que averigua o quanto uma variável aleatória é capaz de influenciar outra que lhe é vizinha. Esta estatística amostral toma valores compreendidos entre 1 (correlação perfeita) e -1 (anti correlação perfeita), sendo que quando toma o valor 0 a correlação é inexistente. Matematicamente define-se da seguinte forma:

$$\rho_{X,Y,k} = \frac{COV(X_i, Y_i)}{\sigma_{X_i}\sigma_{Y_i}} = \frac{E((X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y))}{\sigma_{X_i}\sigma_{Y_i}} \quad (3)$$

onde $\rho_{X,Y,k}$ representam os coeficientes de autocorrelação 1 ou 2 consoante o valor que tome k, respetivamente, X_i os valores da amostra e $Y_i = X_{i+k}$, COV o valor da covariância, E é o operador valor esperado e μ a média da amostra.

Neste trabalho são usados os coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 associados a um dado intervalo de confiança com um nível de significância definido para aferir da independência estatística das amostras que se dispõe, sendo que esta metodologia será novamente abordada nesta dissertação. Assim, apresenta-se na Figura 2.5 a título ilustrativo, a variação em função do limiar da precipitação, dos coeficientes autocorrelação 1 e 2 para o posto udométrico de S.Julião do Tojal para acontecimentos pluviosos com a duração de 1 h.

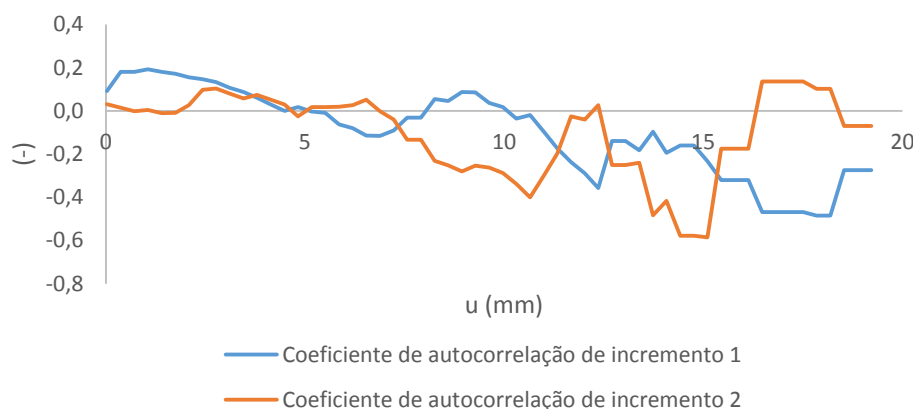


Figura 2.5- Variação dos coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 em função do limiar, u, para a duração de 1h entre 2001/02 e 2011/12 no posto de S. Julião do Tojal.

Para a validação do critério de independência baseado no estudo dos coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2, definem-se ainda intervalos de confiança que permitem inferir acerca da independência estatística dos acontecimentos, cujos limites podem ser dados por:

$$r_k = \frac{-1 \pm \mu_{1-\alpha/2} \sqrt{N-k-1}}{N-k} \quad (4)$$

onde $\mu_{1-\alpha/2}$ representa o valor inverso da função densidade de probabilidade normal padrão para o nível de significância α , N a dimensão da amostra, e k o incremento do coeficiente de autocorrelação. Neste trabalho adotaram-se intervalos de confiança de 95% e ilustra-se, nas Figura 2.6, os coeficientes de autocorrelação 1 e 2 respetivamente, em função do limiar escolhido no contexto das SDP, para os respetivos limites do intervalo de confiança no posto de S.Julião do Tojal com precipitações com duração de uma hora.

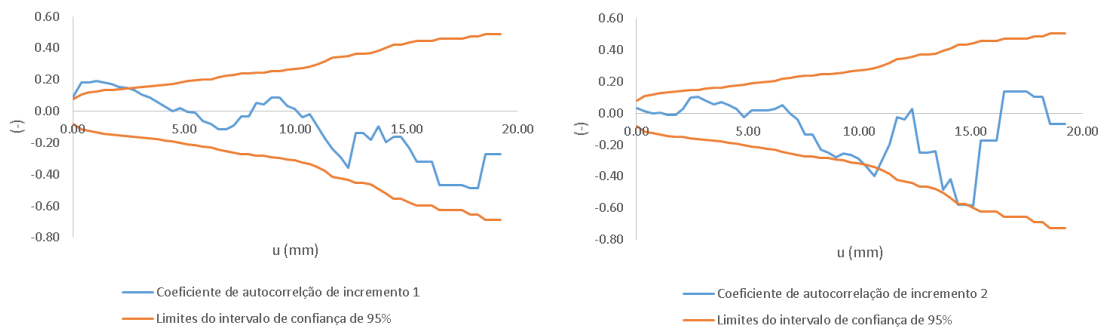


Figura 2.6- Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 em função do limiar escolhido, u , no posto de S.Julião do Tojal para precipitações com duração de 1h.

Como antes mencionado, a técnica das SPD admite que as excedências constituem um processo de Poisson. Para confirmar tal pressuposto, Cunnane (1979) sugere o uso do índice de dispersão (*dispersion index*, na literatura inglesa) ou também chamado Estatística de Fisher, dado pela seguinte fórmula:

$$ID = \frac{S_m^2}{\lambda} \quad (5)$$

onde S_m^2 representa a variância e λ a média da variável m relativa ao número de excedências por ano, ou seja, ao número de ocorrências acima do limiar fixado por ano.

No caso de m seguir um processo de Poisson, o valor de ID deve aproximar-se da unidade, sendo que a estatística dada por ID segue uma distribuição com $M - 1$ graus de liberdade. Isto tem como corolário a não rejeição da hipótese de Poisson, no caso do valor de ID estar de acordo com:

$$ID \in \left[\frac{\chi_{\alpha/2, M-1}^2}{M-1}, \frac{\chi_{1-\alpha/2, M-1}^2}{M-1} \right] \quad (6)$$

sendo α o nível de significância do teste utilizado, que neste trabalho será de 5%, M o número de anos com registos e χ^2 a distribuição qui-quadrado. Pelo facto de a distribuição de Poisson ser apenas uma aproximação, não seria possível obter valores deste índice precisamente iguais à unidade e tal justifica a condição anteriormente enunciada.

A estatística de Fisher é uma medida normalizada de dispersão de uma dada distribuição de probabilidade, e tem como finalidade quantificar se certos acontecimentos observados estão agrupados ou dispersos quando comparados com um dado modelo de referência. Este índice constitui um bom instrumento de medição do grau de aleatoriedade de um dado fenómeno.

O seu valor apenas é definido quando a média λ toma valores diferentes de zero, e é geralmente usado para amostras de valores positivos tais como dados de contagem, de tempo entre acontecimentos, ou em que a distribuição subjacente é assumida como sendo a distribuição exponencial ou distribuição de Poisson, como é o caso das ocorrências dos acontecimentos pluviosos.

Como foi referido, no caso da distribuição de Poisson o valor do índice de dispersão é igual à unidade e, por conseguinte, a média λ e a variância S_m^2 assumem necessariamente o mesmo valor.

Quando o índice de dispersão tem valor superior à unidade, o conjunto de dados da amostra está *sobre-disperso*. Isto pode significar que os dados se encontram agrupados, e que podem haver mais intervalos com muitas ocorrências e outros com poucas.

No caso de $ID < 1$ está-se em presença de dados *sub-dispersos*. Nesta situação, os padrões de ocorrência dos eventos analisados são mais regulares que a aleatoriedade associada a um processo de Poisson. Como exemplo, se a variável aleatória for a distância entre pontos que tem a mesma distância entre si, diz-se que a amostra está sub-dispersa.

A Tabela 2.1 resume a caracterização do índice de dispersão como foi referido anteriormente, assim como as distribuições estatísticas associadas.

Tabela 2.1- Distribuição e caracterização do valor do índice de dispersão (adaptado de WIKIPÉDIA).

<i>Índice de Dispersão (ID)</i>	<i>Distribuição</i>	<i>Dados</i>
0	Variável aleatória constante	Não Dispersos
]0,1[Binomial	Sub-dispersos
1	Poisson	-
>1	Binomial Negativa	Sobre-dispersos

A título de exemplo, ilustra-se na Figura 2.7 os resultados da aplicação da estatística de Fisher à série de precipitações com duração de um dia no posto de S. Julião do Tojal para uma grande gama de limiares. Tais resultados indicam não ser de rejeitar a hipótese de Poisson para qualquer daqueles limiares.

Contudo, importa ter presente que a não rejeição da hipótese de que o número de acontecimentos por ano segue uma distribuição de Poisson não é um aspeto relevante. Com efeito, Silva *et al.* (2014), concluíram que, se o objetivo do estudo que recorreu a séries de duração parcial for o de obter estimativas da uma dada variável para os quantis superiores, com probabilidades de não-excedência da ordem de 80% ou mais (ou seja, períodos de retorno superiores ou iguais a 5 anos), a não confirmação daquela hipótese (por um teste de aderência, como seja a estatística de Fisher) não afeta tais estimativas.

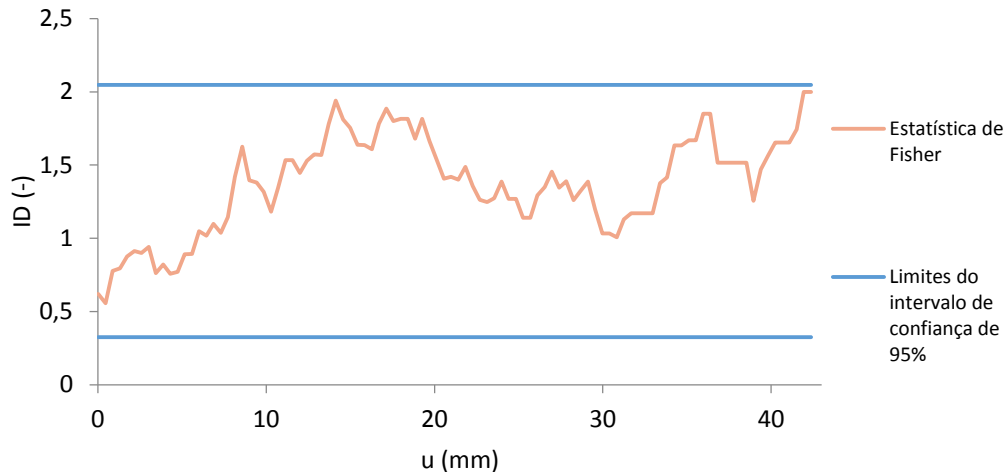


Figura 2.7- Representação gráfica do índice de dispersão, em função do limiar, u , com base nas precipitações com duração de 24 horas no posto de S.Julião do Tojal nos anos hidrológicos de 2001/02 a 2011/12.

2.2.4 Seleção do limiar

A seleção do limiar, u , é um passo determinante na constituição de séries de duração parcial. O valor de u deve ser tal que se verifiquem as hipóteses básicas do processo estocástico bivariado que modela a magnitude e a ocorrência de eventos, nomeadamente, a hipótese de independência serial das excedências e a hipótese de o processo pontual das ocorrências ser descrito por um processo de Poisson. A seleção de u introduz uma subjetividade considerável na modelação de valores extremos por SDP, uma vez que, para o efeito, não existe um único critério universalmente aceite Silva *et al.* (2012).

Para a seleção de um dado limiar, u , Lang *et al.* (1999) propõem a consideração de três fatores (Silva *et al.*, 2012):

- Controlo do número médio de excedências por ano, λ (como definido para os processos de Poisson);
- Análise da variação da excedência média acima do limiar $\overline{X_{DP} - u}$ em função de u (na literatura técnica em inglês, *mean excess plot* ou *mean residual life plot*), sendo X_{DP} e u a magnitude de ocorrência e o limiar, respetivamente;
- Validação da hipótese de Poisson mediante controlo da estatística de Fisher ou índice de dispersão, ID.

A escolha do limiar está desde logo limitada a alguns fatores que não permitem a seleção de valores nem muito elevados, nem muito reduzidos. Um limiar demasiado alto origina poucos picos e, assim, uma amostra menor que pode desconsiderar valores passíveis de serem tratados como extremos, e por isso, desconsiderar o próprio objetivo da análise por SDP. Por outro lado, a seleção de um limiar muito baixo, implica desde logo a possível inclusão na amostra de valores muito reduzidos que não representem extremos, e dificulta o assegurar da independência de acontecimentos pluviosos, ainda que possam ser separados por períodos diários sem chuva.

Tendo por base o primeiro critério de Lang *et al.* (1999), Cunnane (1973) demonstrou que, quando as amostras têm poucos anos com registos e $\lambda > 1.65$, a estimação de parâmetros se torna mais eficiente quando comparada com as séries de máximos anuais. Lang *et al.* (1999) propõem, por sua vez, adotar um u , tal que $\lambda > 2$ ou 3, sendo este último valor o adotado como critério neste trabalho.

Relativamente ao segundo ponto, faz-se alusão a Davison & Smith (1990) que referem que, analisando a variação da excedência média acima do limiar $\overline{X_{DP} - u}$ em função do próprio limiar u , se conclui que o valor de u se situa numa zona da função aproximadamente linear (constante, crescente ou decrescente). Este critério garante que os parâmetros da distribuição que modela as excedências nas séries de duração parcial são estáveis, quando a distribuição pertence à família de Pareto.

Na Figura 2.8 apresentam-se exemplos dos valores da variação da excedência média $\overline{X_{DP} - u}$ e do número médio de excedências λ em ordem ao limiar u . De modo a facilitar a leitura e análise, o gráfico contém ainda os limites do intervalo de confiança de 95% para a excedência média, estimados partindo do princípio que seguem aproximadamente uma distribuição normal. Note-se que o gráfico apresenta diferentes escalas no valor da precipitação (eixo vertical) de modo a facilitar a leitura e compatibilização das variáveis em estudo.

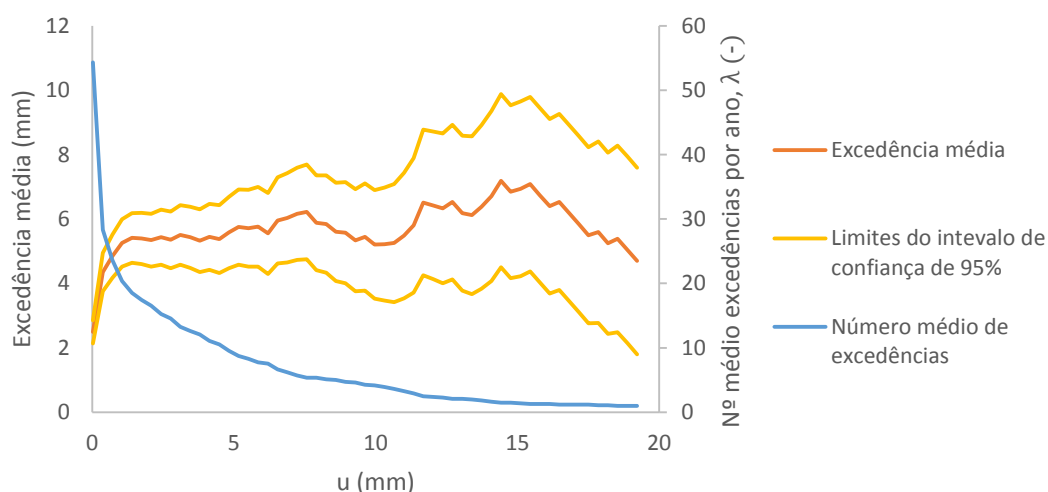


Figura 2.8– Excedência média, respetivos intervalos de confiança de 95% e número médio de excedências por ano no posto de S.Julião do Tojal para a duração de 1h nos anos hidrológicos entre 2001/02 e 2011/12.

Da leitura do gráfico percebe-se que para valores de $u < 2$ mm, a relação entre a excedência média $\overline{X_{DP} - u}$ e o valor de u segue uma curva crescente que depois estabiliza sensivelmente num trecho aproximadamente linear e constante até $u=8$ mm. Para valores de $u > 8$ mm o gráfico revela alguma instabilidade apesar de se poder aproximar alguns troços a retas com declives positivos ou negativos. A variação abrupta no comportamento da função que relaciona $\overline{X_{DP} - u}$ com u pode estar relacionada com a insuficiência de picos acima do limiar de $u=8$ mm que condiciona a estimativa de $\overline{X_{DP} - u}$ e é revelado pelo maior afastamento dos limites do intervalo de confiança de 95% nessa zona do gráfico.

Relativamente ao terceiro ponto referido por Lang *et al.* (1999), diga-se, como já foi explicitado antes, que o índice de dispersão se deve aproximar da unidade e estar dentro do intervalo definido pela equação (6) para se garantir que a amostra das excedências acima do limiar se modela por um

processo de Poisson. Neste trabalho assume-se que todas as amostras de SDP recolhidas seguem um processo de Poisson, não se tendo procedido sistematicamente à verificação em causa.

Assim, tem-se resumidamente três fatores que condicionam, dentro de determinados intervalos definidos, o valor dos limares admissíveis em cada amostra:

- Numero anual médio de acontecimentos, λ , maior do que 3 segundo Lang *et al.* (1999) – Figura 2.9 .
- Comportamento aproximadamente linear (crescente, decrescente ou constante) da excedência média em função do limiar u de acordo com Davison & Smith (1990) – Figura 2.10.
- Análise de autocorrelações de incremento 1 e 2 dentro dos limites do intervalo de confiança, para assegurar independência estatística da amostra como refere Miquel *et al.* (1984) – Figura 2.11.

2.2.5 Procedimentos de análise estatística. Teoria de valores extremos e distribuição generalizada de Pareto, GDP

Os “picos” retirados das séries de duração parcial acima de um determinado limiar definido, representam valores extremos observados em séries temporais que se assumem descritas por um processo de Poisson. Dito de uma outra forma, caso se tenha $\{X_i: i = 1, 2, \dots\}$, que representa um conjunto de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas, os pontos de excedência acima de um limiar u , $\{i = X_i > u\}$, assumem-se com sendo valores modelados por um processo de Poisson.

Neste subcapítulo apenas se faz referência aos valores extremos acima do limiar, pois são os que constituem as amostras das séries de duração parcial, e, nesse âmbito, será abordada a teoria dos valores extremos e a distribuição generalizada de Pareto, que inclui a distribuição exponencial como um dos seus casos particulares, como adequada para a modelação de excedências que resultem de um processo de Poisson.

O estudo estatístico de valores extremos tem desempenhado um papel importante na prática da engenharia para a gestão de sistemas de recursos hídricos. Com o desenvolvimento recente da teoria estatística de valores extremos, pode-se atualmente aplicar a mesma para análises que sejam mais significativas fisicamente (Katz, Parlange, & Naveau, 2002).

Na observação estatística de acontecimentos regularmente analisados no quotidiano, os valores extremos podem ter pouca relevância, ou até serem retirados das amostras por se afastarem muito de um padrão estatístico ou por conferirem resultados que não refletem a verdadeira realidade, respetivamente.

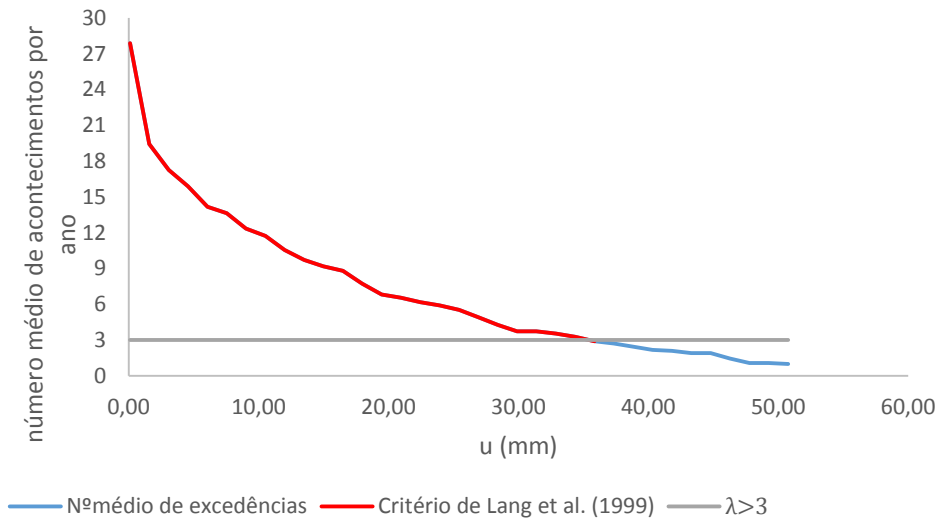


Figura 2.9 - Variação do número médio de excedências em ordem ao limiar, u , para precipitações com duração de 24h no posto de S.Julião do Tojal nos anos hidrológicos de 2001/02 a 2011/12. Critério sugerido por Lang et al. (1999), $\lambda > 3$.

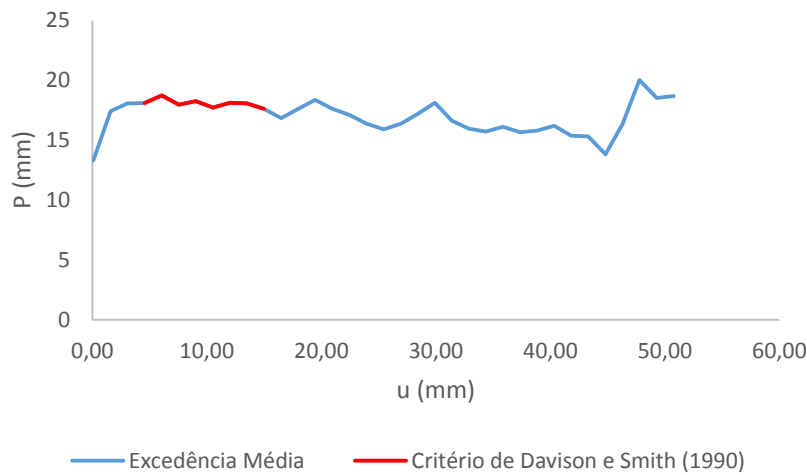


Figura 2.10- Variação da excedência média em ordem ao limiar, u , para precipitações com duração de 24h no posto de S.Julião do Tojal nos anos hidrológicos de 2001/02 a 2011/12. Critério sugerido por Davison & Smith (1990) com representação de um troço linear aproximadamente constante.

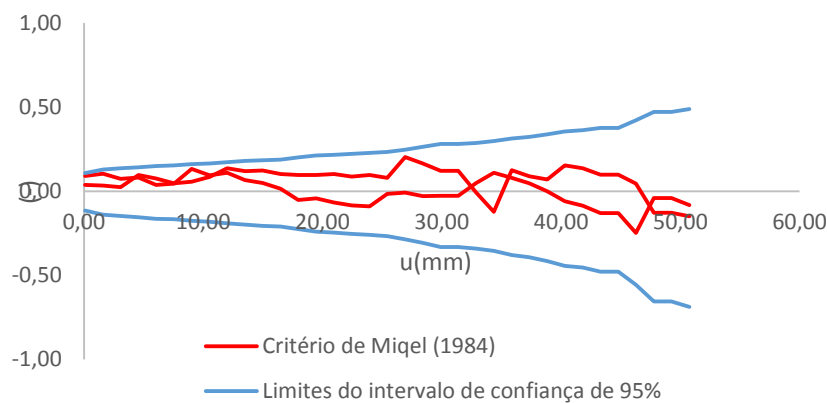


Figura 2.11 - Variação dos coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 em ordem ao limiar, u , para precipitações com duração de 24h no posto de S.Julião do Tojal nos anos hidrológicos de 2001/02 a 2011/12. Critério sugerido por Miquel et al. (1984), com representação dos coeficientes dentro dos limites do intervalo de confiança de 95% (embora os limites para cada coeficiente de correlação sejam diferentes, os seus valores são muito próximos, pelo que não se faz distinção graficamente, usando apenas os limites do IC para o incremento 2).

Porém, pode em alguns casos ser necessário um estudo dos valores raros de uma dada amostra, sendo que isso motiva necessariamente uma análise com métodos estatísticos próprios e uma metodologia diferente na recolha dos dados considerados extremos, e neste contexto surge a Teoria dos Valores Extremos.

A Teoria de Valores Extremos, TVE, (do inglês *Extreme Value Theory*, EVT) é um ramo probabilístico de suporte à Estatística que lida com situações em que os dados são escassos, os chamados acontecimentos raros ou extremos. A TVE ajuda a descrever e a quantificar o comportamento desses acontecimentos, procurando estimar uma possível distribuição limite para os máximos (ou mínimos) da amostra composta por variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (Rosário, 2013). O campo de aplicação desta teoria é bastante amplo e vai desde a hidrologia a outras áreas do conhecimento como a economia e finanças, a meteorologia, as telecomunicações, a geologia entre outras.

A principal característica distintiva de uma análise em valores extremos é o facto de se pretender quantificar o comportamento estocástico de um processo com níveis extremamente elevados ou baixos. Em particular, este tipo de análise, geralmente, requer a estimação de probabilidades de acontecimentos que são mais extremos do que qualquer um que já tenha sido observado, ou seja, a TVE permite a extrapolação para além da amostra disponível (Rosário, 2013).

Por norma, no caso particular da análise de acontecimentos pluviosos extremos, o objetivo da TVE é a obtenção de estimativas plausíveis de quantis elevados de pluviosidade que excedam um dado valor. Torna-se por isso necessário definir o que é um “extremo”, sendo que neste contexto existem duas formas de fazer a sua identificação:

- Quando se considera como os valores máximos os que uma dada variável aleatória toma em sucessivos períodos, por norma anos. Este tipo de observações também se designam “blocos de máximos” ou SMA, como antes mencionado.
- Quando se foca em valores que excedem um dado limiar, que por norma se considera como elevado, que é o caso das já referidas SDP.

Na Figura 2.12 encontra-se representado graficamente as duas formas de identificação de extremos para o uso da TVE.

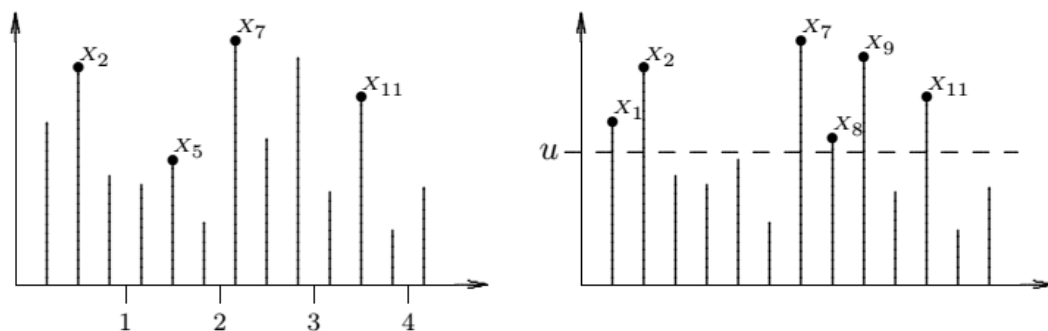


Figura 2.12- Exemplos adimensionais de “blocos de máximos” ou SMA (à esquerda) e valores acima de um limiar ou SDP (à direita).

Diretamente relacionadas com os diferentes conceitos de valores extremos e no âmbito da TVE existem diferentes metodologias de definição e sistematização de tais observações. As respetivas abordagens conduzem à constituição das amostras mediante processos distintos:

- A metodologia clássica de Gumbel, que extrai os extremos por blocos. Desta surge a técnica das Séries de Máximos Anuais, SMA, onde se analisa apenas o valor máximo de cada ano de registos, sendo cada ano encarado como um bloco de máximos.
- O método das excedências sobre um limiar, *Peaks-Over-Threshold*, que inclui diversas técnicas, tais como a das maiores estatísticas de ordem (não abordada neste trabalho) e a técnica das séries de duração parcial, SDP (F. C. Correia, 2013).

Na análise de fenómenos extremos, ambas as metodologias têm como objetivo primordial identificar o comportamento da cauda¹ direita da distribuição subjacente aos valores extremos em causa. Uma explícita modelação de valores extremos corresponde apenas a um ajuste da cauda da distribuição dos dados originais com vista à inferência de quantis extremos, ressaltando o carácter pouco informativo que pode ter o interior da distribuição para as ocorrências de baixa frequência.

Existem hoje formas de estimar as distribuições de cauda de acordo com cada uma das metodologias anteriormente enunciadas:

- Para os dados de SMA, a análise pode depender em parte, dos resultados dos teoremas de Fisher & Tippett (2008) e Gnedenko (1943) levando a uma distribuição generalizada de valores extremos, TVE, caracterizada por uma distribuição assintótica de estatísticas de ordem extrema;
- Para dados acima de um limiar como é o caso das SDP, a análise envolve o ajustamento de duas distribuições sendo uma para o número de eventos num período de tempo básico – distribuição de *Poisson* - e a segunda para a magnitude de excedências – distribuição generalizada de *Pareto*.

No que diz respeito ao primeiro ponto, foi estabelecido por Fisher & Tippett (2008) e refere que existem três distribuições não-degeneradas limite (distribuições cujo domínio consiste em mais do que um único valor) para o máximo normalizado de uma amostra aleatória – as distribuições de Gumbel, Fréchet e Weibull - sendo que tal é demonstrado rigorosamente por Gnedenko (1943), uns anos depois.

Segundo Fisher & Tippett (2008) e Gnedenko (1943) considera-se uma sequência de variáveis aleatórias i.i.d que no caso de existirem constantes normalizas $c_n > 0$ e $d_n \in \mathbb{R}$, e uma distribuição não degenerada H tal que:

$$\frac{M_n - d_n}{c_n} \xrightarrow{d} H \quad (7)$$

¹ A cauda de uma função de densidade de probabilidade é o termo designado para as zonas extremas (quer à esquerda, quer à direita) dessa função. A um maior “ peso” da cauda superior de uma função distribuição de probabilidades equivale uma maior intensidade com que os quantis aumentam, à medida que os períodos de retorno tendem para valores muito elevados. Em outras palavras, o peso da cauda superior é proporcional às probabilidades de excedência associadas a quantis elevados e é reflexo da intensidade com que a função (x) decresce quando tende para valores muito elevados.

onde \xrightarrow{d} representa convergência em distribuição² medida que $n \rightarrow \infty$, d_n a média, e c_n o desvio padrão dos valores máximos (F. C. Correia, 2013). M_n refere-se ao máximo do conjunto de valores da variável aleatória i.i.d. e a função H representa uma das três funções de distribuição de probabilidade que segue:

Função de Fréchet:

$$\phi_\alpha(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ e^{-x^{-\alpha}}, & x > 0 \end{cases} \quad \alpha > 0, \quad (8)$$

Função de Weibull:

$$\Psi_\alpha(x) = \begin{cases} e^{-(-x)^\alpha}, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad \alpha > 0 \quad (9)$$

Função de Gumbel:

$$\Lambda(x) = e^{-e^{-x}}, \quad x \in \mathbb{R}. \quad (10)$$

sendo α um parâmetro de forma.

A forma das funções de probabilidade antes mencionadas é dada na Figura 2.13.

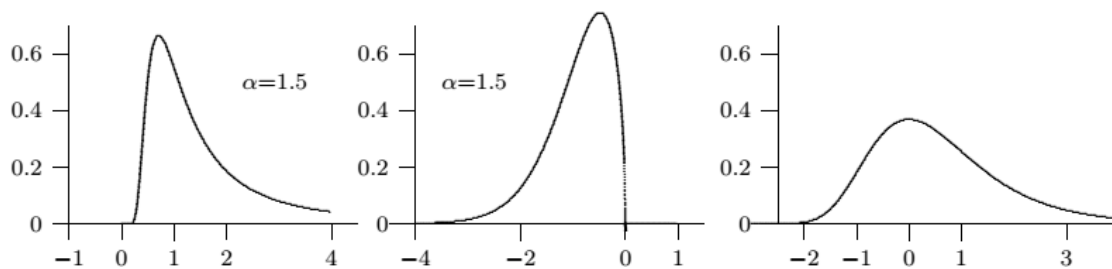


Figura 2.13– Comportamento das funções densidade de probabilidade de Fréchet, Weibull e Gumbel respectivamente (adaptado de Gilli, 2006)).

Observa-se que a distribuição de Fréchet tem uma cauda polinomial descendente e portanto ajusta-se bem a distribuições de cauda pesada. As caudas que decaem exponencialmente como é o caso da distribuição de Gumbel caracterizam as distribuições de cauda leve. Por fim, as distribuições de Weibull dizem respeito a distribuições assintóticas de pontos finitos

Mais tarde Mises (1936) e Jenkinson (1955) unificaram as três distribuições antes referidas na distribuição generalizada de valores extremos (do inglês *generalized extreme theory*, GEV), para domínios de atração do máximo, como se ilustra de seguida:

$$H_\xi(x) = \begin{cases} e^{-(1+\xi x)^{-1/\xi}}, & \text{se } \xi \neq 0 \\ e^{-e^{-x}}, & \text{se } \xi = 0 \end{cases} \quad (11)$$

² Seja X uma variável aleatória com função de distribuição acumulada F e seja $\{X_n\}_{n \geq 1}$ uma sequência de variáveis aleatórias com respetivas funções de distribuição acumuladas $\{F_n\}_{n \geq 1}$ (F_n é a função de distribuição acumulada de X_n). Então, diz-se que X_n converge em distribuição para X se $F_n(x) \rightarrow F(x)$ para todo x quando $n \rightarrow \infty$, em que x é um ponto de continuidade de F .

com x sendo tal que $1 + \xi x > 0$. Esta generalização é obtida assumindo $\xi = \alpha^{-1}$ no caso da distribuição de Fréchet, $\xi = -\alpha^{-1}$ para a distribuição de Weibull e interpretando a função de Gumbel no caso limite de $\xi = 0$.

Geralmente não se sabe de antemão qual o tipo de distribuição limite dos máximos de uma dada variável aleatória, e nesse sentido uma distribuição generalizada como a GEV tem utilidade. A equação (10) é definida para limitar distribuições de extremos normalizados. Tendo isso em consideração, não se pode inferir acerca dos valores das constantes normalizadas c_n e d_n da equação (7) e por esse motivo usam-se três parâmetros para caracterizar a GEV, como se demonstra (Gilli & Këllezli, 2006):

$$H_{\xi, \sigma, \mu}(x) = H_{\xi}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \quad x \in D, \quad D = \begin{cases}]-\infty, \mu - \frac{\sigma}{\xi}[& \xi < 0 \\]-\infty, \infty[& \xi = 0 \\ \left[\mu - \frac{\sigma}{\xi}, \infty\right[& \xi > 0 \end{cases} \quad (12)$$

tal que μ e σ representam respetivamente os parâmetros de posição e escala da constantes normalizadas desconhecidas e ξ o parâmetro de forma. Esta formulação da GEV representa uma distribuição limite de máximos não-normalizados.

O segundo ponto antes enunciado, referente ao tratamento estatístico das SPD, baseia-se na teoria de Pickands (1975) e Balkema & Haan (1974) que indicam a distribuição generalizada de Pareto, como a que melhor se ajusta para a distribuição assintótica das excedências acima de limiares elevados, e que pode ser interpretada com uma família de distribuições que pode incluir casos particulares com a distribuição Pareto, Exponencial ou Uniforme em condições de domínio de atração do máximo para as SDP.

A distribuição Generalizada de Pareto (GPD, do inglês *Generalized Pareto Distribution*) que deriva da distribuição GEV, é uma família de distribuições de probabilidades contínuas usadas frequentemente para modelar as caudas de outras distribuições estatísticas.

As suas aplicações na engenharia, seguros, meteorologia, finanças – apenas para referir algumas – são amplamente divulgadas na literatura. Nos últimos anos, a investigação extensiva tem sido focada na caracterização da GPD em derivação de resultados das áreas das probabilidades e estatística. O seu uso explícito foi introduzido por (Pickands, 1975), sendo desde então largamente aplicada por outros autores como Beirlant *et al.* (1996, 2004), Embrechts *et al.* (1997), Coles (2001), Castillo *et al.* (2004), Kotz e Nadarajah (2000), entre outros.

Considere-se uma função de distribuição de probabilidade desconhecida F , de uma variável aleatória i.i.d. desconhecida X , e pretende-se estimar a função de distribuição F_u da variável x acima de um certo limiar u . A função de distribuição F_u refere-se a uma excedência condicional e é definida como:

$$F_u(y) = P(X - u \leq y | X > u), \quad 0 \leq y \leq x_F - u \quad (13)$$

sendo X uma variável aleatória, u o limiar considerado, $y = x - u$ as excedências e x_F o valor finito ou infinito mais baixo à direita de F . Isto é o mesmo que considerar x_F como:

$$x_F = \sup\{x \in \mathbb{T}: F(x) < 1\} \leq \infty \quad (14)$$

Verifica-se que F_u pode ser escrito da seguinte forma:

$$F_u(y) = \frac{F(u+y) - F(u)}{1 - F(u)} = \frac{1 - F(u+y)}{1 - F(u)} \quad (15)$$

Agora assumamos que F é uma distribuição generalizada de valores extremos, tal que:

$$F(x) = e^{-[1 + \xi(\frac{x-\mu}{\sigma})]^{-1/\xi}} \quad (16)$$

para qualquer $\mu, \sigma > 0$ e $\xi \in \mathbb{T}$. Assim a probabilidade condicional, quando $X > u$, tendo em conta que:

$$n \ln F(x) \approx - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \quad (17)$$

e que para valores de x elevados deve-se fazer uma expansão de Taylor de forma que $\ln F(x) \approx -\{1 - F(x)\}$, substituindo e rearranjando para u tem-se que :

$$1 - F(u) \approx \frac{1}{n} \left[1 + \xi \left(\frac{u - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \quad (18)$$

E de igual forma, para $y > 0$:

$$1 - F(u+y) \approx \frac{1}{n} \left[1 + \xi \left(\frac{u+y-\mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \quad (19)$$

Com isto conclui-se o seguinte:

$$P(X - u \leq y | X > u) = \frac{1 - F(u+y)}{1 - F(u)} = \frac{\frac{1}{n} \left[1 + \xi \left(\frac{u+y-\mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi}}{\frac{1}{n} \left[1 + \xi \left(\frac{u-\mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi}} = \left(1 + \frac{\xi y}{\tilde{\sigma}} \right)^{-1/\xi} \quad (20)$$

onde μ, σ e ξ são parâmetros que posição, escala e forma, respetivamente, e $\tilde{\sigma} = \sigma + \xi(u - \mu)$. Deste modo, a função de distribuição de $(X - \mu)$ condicionada a $X > \mu$, é aproximadamente:

$$H(y) = 1 - \left(1 + \frac{\xi y}{\tilde{\sigma}} \right)^{-\frac{1}{\xi}}, \text{ se } y > 0 \text{ e } \left(1 + \frac{\xi y}{\tilde{\sigma}} \right) > 0 \quad (21)$$

A distribuição definida anteriormente é chamada de função de *distribuição Generalizada de Pareto* (GPD). Esta função de distribuição condicional, à semelhança do que ocorre com a função GEV, representa a unificação de três outras distribuições.

Assim, enquanto a distribuição GEV é uma distribuição limite para o máximo de uma variável, a distribuição Generalizada de Pareto é a forma paramétrica para as distribuições limite de excedências acima de um determinado limiar (F. C. Correia, 2013).

Neste âmbito os estudos de Balkema & Haan (1974) e Pickands (1975) referem a GPD como ferramenta para obter a distribuição da cauda de uma variável aleatória, quando a sua função de distribuição é desconhecida. Por vezes é utilizado para justificar o uso de uma lei exponencial para a modelação de eventos extremos. Os mesmos referem que a distribuição generalizada de Pareto por tomar os seguintes comportamentos em função do parâmetro de forma ξ :

- Quando $\xi = 0$ é reduzida a uma função exponencial
- Quando $\xi > 0$ segue uma distribuição de Pareto II
- Quando $\xi < 0$ segue uma distribuição de Pareto comum

Diversos métodos foram propostos para estimar os parâmetros que definem a GPD no caso de excedências que ultrapassam os limiares no âmbito das SDP. Pickands (1975, 1984 e 1993) aborda a metodologia de estimação desses parâmetros combinada com procedimentos de seleção do limiar que define as excedências. Estes incluem métodos não-paramétricos, Bayesianos³, estatísticas de ordem, entre outras abordagens.

À semelhança do que acontece nas distribuições que unificam a GEV, no caso da GPD no limite em que $\xi \rightarrow 0$ para a função de distribuição de condição $X > u$ com variável $(X - u)$, é seguida uma função idêntica à de Gumbel, com a seguinte formulação:

$$H(y) = H(x - u) = 1 - e^{-\frac{y}{\sigma}}, \quad \text{com } y > 0 \quad (22)$$

que tem como função de densidade de probabilidade a seguinte formula:

$$h(y) = h(x - u) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + \frac{\xi y}{\sigma}\right)^{-1-1/\xi}, \quad \text{com } \xi \neq 0 \quad (23)$$

Nas Figuras 2.14 e 2.15 apresentam-se para a GPD, respetivamente, as funções de distribuição e densidade de probabilidade das três funções que a unificam, como referido anteriormente. Assim, variando o parâmetro de forma ξ obtêm-se os diferentes comportamentos Pareto Comum, Exponencial e Pareto II.

³ A inferência bayesiana é um tipo de inferência estatística que descreve as incertezas sobre as quantidades invisíveis de forma probabilística. As incertezas são modificadas periodicamente apos observações de novos dados ou resultados. A operação que calibra a medida das incertezas é conhecida como operação bayesiana e é baseada na fórmula de Bayes.

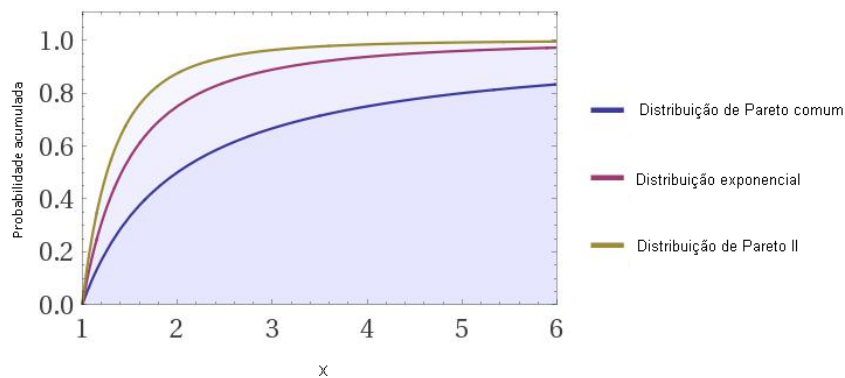


Figura 2.14– Função de probabilidade generalizada de Pareto para os tipos Comum, Exponencial e Pareto I (adaptado de WOLFRAM ALPHA).

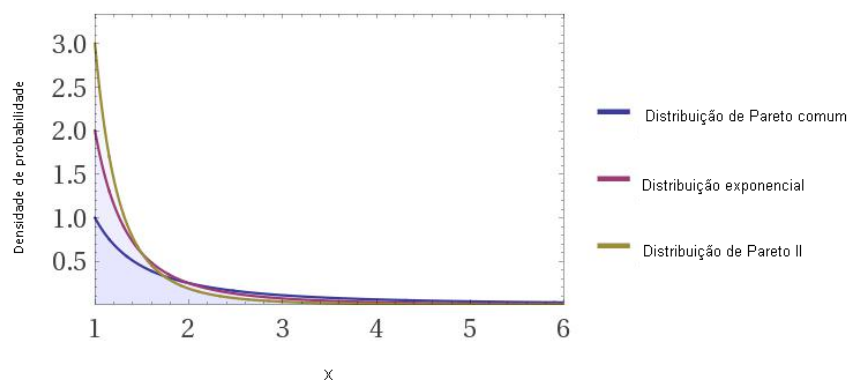


Figura 2.15- Função densidade de probabilidade generalizada de Pareto para os tipos Comum, Exponencial e Pareto I (adaptado de WOLFRAM ALPHA).

As famílias de distribuições GPD e GVE encontram-se relacionadas da seguinte forma:

$$F(x) = 1 + \ln(H(x)), \text{ com } \ln(H(x)) > -1 \quad (24)$$

Na Figura 2.16 representa-se uma comparação de algumas funções densidade de probabilidade das famílias de distribuições GPD e GEV.

Analisando a Figura 2.16 nota-se que as funções de densidade de probabilidade assumem caudas direitas que são assintoticamente equivalentes, o que se justifica para valores elevados de x pelo facto do valor do limiar u perder preponderância na expressão da função densidade de probabilidade da GPD.

Menciona-se, por fim, que a metodologia de estimativa de parâmetros de uma dada distribuição de probabilidade a partir de uma amostra influencia o grau de ajuste dos modelos probabilísticos em estudo. A sua utilidade prende-se com o fato de por exemplo, no estudo de precipitações, em muitos casos haver uma baixa densidade de postos udométricos e também pelo curto período de tempo dos registos disponíveis.

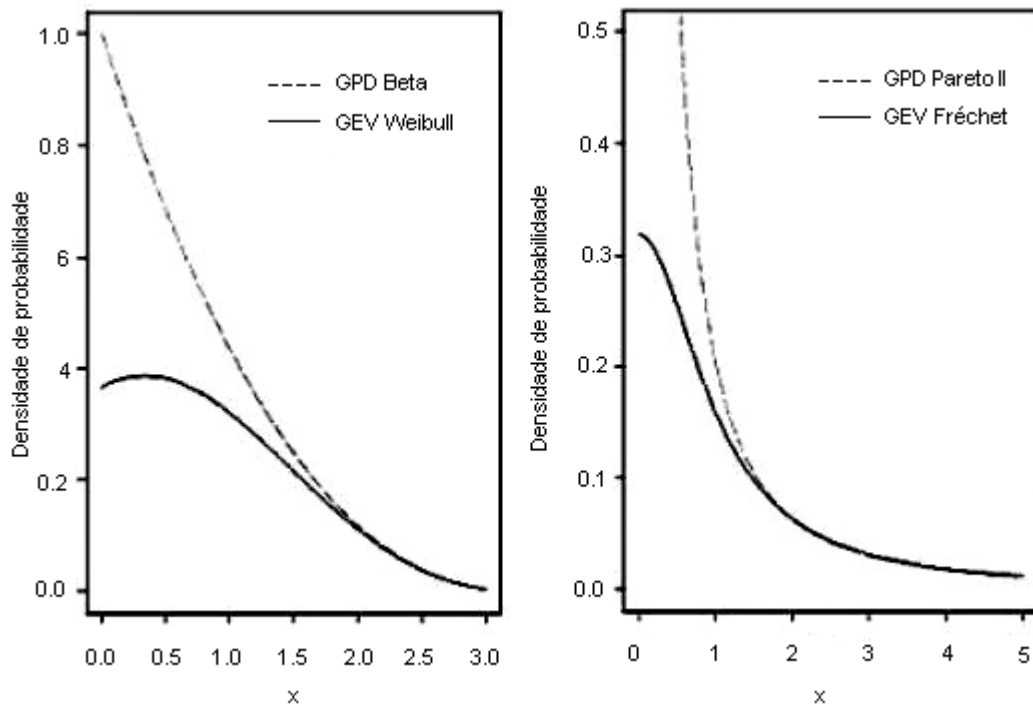


Figura 2.16- Densidades de probabilidade: (Esquerda) GPD (Beta) e GEV (Weibull), contínua, ambas com parâmetro $\xi=-0.3$. (Direita) GPD (Pareto II) e GEV (Fréchet) com parâmetros $\xi=1$, $\mu=-0.25$ e $\sigma=1/\pi$.

Segundo Naghettini & Pinto (2007) o método dos momentos (na literatura inglesa, *method of moments*, MOM) é o mais simples para a estimação de parâmetros, embora os resultados sejam de menor qualidade em comparação com outros métodos como o da Máxima Verosimilhança, sobretudo quando as distribuições são constituídas por três ou mais parâmetros. Não obstante esta observação foi aquele o método aplicado à estimativa dos parâmetros de escala σ , e de forma ξ , da distribuição generalizada de Pareto utilizada na análise estatística das SDP. Para o efeito, aplicaram-se as seguintes equações:

$$\hat{\xi}_{MOM} = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{Z}^2}{S_Z^2} - 1 \right) \quad (25)$$

$$\hat{\sigma}_{MOM} = \frac{\bar{Z}}{2} \left(\frac{\bar{Z}^2}{S_Z^2} + 1 \right) \quad (26)$$

onde \bar{Z}^2 e S_Z^2 representam respetivamente a média e a variância da variável aleatória $Z = X - u$, enquanto que $\hat{\xi}_{MOM}$ e $\hat{\sigma}_{MOM}$ os parâmetros de forma e escala estimados pelo método dos momentos, respetivamente.

No contexto da aplicação das SDP, uma vez escolhida a distribuição exponencial como descritora do comportamento da população $\xi = 0$, a estimação dos quantis de probabilidade depende apenas da estimativa do parâmetro de escala $\hat{\sigma}_{MOM}$ (F. C. Correia, 2013).

2.2.6 Período de retorno estabelecido a partir de SDP

A utilização das séries de duração parcial levanta sempre questões relacionadas com a escolha dos modelos que melhor se ajustam, quer à frequência dos eventos extremos, quer à sua magnitude. Como

já foi referido, geralmente é utilizada a distribuição de Poisson para modelar a taxa anual de excedências dos eventos, enquanto a Distribuição Generalizada de Pareto é mais indicada para modelar a magnitude dos valores acima do limiar definido.

De modo a apreciar a razoabilidade das estimativas fornecidas pela técnica das SDP, é necessário que se disponha de frequências de acontecimentos independentes do tempo comparáveis com as decorrentes de outras metodologias. Por outras palavras, é necessário relacionar as probabilidades de não-excedência que decorrem da análise por SDP com períodos de retorno necessariamente definidos numa base anual, suscetíveis de atribuídos a estimativas fornecidas pela análise convencional baseada em séries de máximos anuais.

Visto ser critério de projeto no dimensionamento de estruturas hidráulicas, um período de retorno expresso em anos, opta-se por fazer depender do tempo, com uma frequência anual, a taxa de excedências no âmbito das SDP (F. C. Correia, 2013). Com isto, apresenta-se neste subcapítulo a metodologia que permite a estimação dos quantis de probabilidade das SDP sendo a taxa de excedência de eventos uma variável anual.

No caso das SDP, sendo λ um estimador da taxa de ocorrências da distribuição de Poisson, igual ao número médio de eventos por ano acima de um limiar estabelecido u , é possível provar que a função de distribuição de máximos anuais $F_a(x)$, a função de distribuição das SDP, $H_u(x)$, e a intensidade anual de ocorrências λ dos eventos acima limiar definido u , se relacionam da seguinte forma (Naghetini & Pinto, 2007):

$$F_a(x) = e^{-\lambda[1-H_u(x)]} \quad (27)$$

sendo $1-F_a(x)$ a probabilidade de excedência anual temos que:

$$1 - F_a(x) = 1 - e^{-\lambda[1-H_u(x)]} \quad (28)$$

Com a introdução do conceito de período de retorno, tem-se que a probabilidade de excedência anual $1-F_a(x)=1/T_a$, onde T_a é o período de retorno expresso em anos. A probabilidade de excedência numa SDP para um dado valor x é $1-H_u(x)$ que no caso será representada por q_i e assim temos a seguinte equação:

$$\frac{1}{T_a} = 1 - e^{-\lambda q_i} \quad (29)$$

De acordo com Stedinger, Vogel, & Foufoula-Georgiou (1993), a seguinte relação introduz o tempo de retorno T_p , referente as séries de duração parcial:

$$T_p = \frac{1}{\lambda q_i} \quad (30)$$

Posto isto, após algumas transformações e substituições relacionam-se os períodos de retorno de máximos anuais e séries de duração parcial de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{1}{T_a} = 1 - e^{-\frac{1}{T_p}} \Leftrightarrow T_a = \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{T_p}}} \vee T_p = \frac{1}{\ln(T_a) - \ln(T_a - 1)} \quad (31)$$

Refira-se como ponto significativo na aplicação da relação (27) o ajuste da distribuição de Poisson às taxas de excedência λ . Cunnane (1979) propõe para isso um teste que aproxima a distribuição de Poisson através da distribuição Normal, sendo que o mesmo pode ser encontrado em Naghettini & Pinto (2007).

Na estimação de quantis de probabilidade no âmbito de máximos anuais segue-se as formulações de Naghettini & Pinto (2007) que propõe para esse fim o modelo de Poisson-Pareto. O mesmo é um modelo flexível e fisicamente razoável para a aplicação a diversos fenómenos e tem a vantagem de se poderem usar estimativas da distribuição generalizada dos valores extremos com um dado parâmetro de forma ξ , quer a partir de máximos anuais quer a partir de séries de duração parcial.

Assuma-se agora que $F_a(x)=F(x)$ e $H_u(x)=H(x)$ por uma questão de simplicidade e considere-se assim a função de distribuição de Pareto:

$$H(x) = 1 - e^{-y} \quad (32)$$

$$y = \begin{cases} -\frac{\ln\left[1 - \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right]}{\xi}, & \xi \neq 0 \\ \frac{x-u}{\sigma}, & \xi = 0 \end{cases}, \quad \xi \neq 0 \quad (33)$$

A dedução da equação (27) leva a:

$$\ln[F(x)] = -\lambda[1 - H(x)] \Leftrightarrow \frac{\ln[F(x)]}{\lambda} = H(x) - 1 \Leftrightarrow H(x) = 1 + \frac{1}{\lambda}\ln[F(x)] \quad (34)$$

Igualando as equações (32) e (33) e após algumas simplificações matemáticas obtém-se o seguinte:

$$1 - e^{-y} = 1 + \frac{1}{\lambda}\ln[F(x)] \Leftrightarrow y = -\ln\left\{-\ln[F(x)]^{\frac{1}{\lambda}}\right\} \quad (35)$$

Tem-se para a equação anterior dois casos possíveis de solução dependentes do fator de forma ξ que altera o comportamento de y .

O primeiro caso com $\xi \neq 0$ a distribuição generalizada de Pareto toma o valor de $y = -\frac{\ln\left[1 - \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right]}{\xi}$ que substituindo na equação (34), após algumas deduções matemáticas se tem:

$$-\frac{\ln\left[1 - \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right]}{\xi} = -\ln\left\{-\ln[F(x)]^{\frac{1}{\lambda}}\right\} \quad (36)$$

\Leftrightarrow

$$x = u + \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - \left[-\frac{\ln[F(x)]}{\lambda} \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\}, \quad \text{com } F(x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (37)$$

Por fim, tem-se agora o caso em que $\xi=0$, que na distribuição generalizada de Pareto se considera agora $y = \frac{(x-u)}{\sigma}$, que substituído na equação (36) e desenvolvido em ordem a x se obtém:

$$\frac{(x-u)}{\sigma} = -\ln \left\{ -\ln[F(x)]^{\frac{1}{\lambda}} \right\} \Leftrightarrow x = u - \sigma \ln \left\{ -\ln[F(x)]^{\frac{1}{\lambda}} \right\}, \quad \text{com } F(x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (38)$$

Note-se ainda que $-\ln[F(x)]^{\frac{1}{\lambda}} = -\frac{1}{\lambda} \ln[F(x)]$ e com isto, deduzindo a equação anterior chega-se à conclusão que:

$$x = u + \sigma \{ \ln(\lambda) - \ln(-\ln[F(x)]) \} \quad (39)$$

Que representa a estimação dos quantis de probabilidades das SDP, para o período de retorno relativo a máximos anuais.

2.3 Curvas intensidade-duração-frequência e linhas de possibilidade

udométrica.

2.3.1 Introdução

Uma das variáveis hidrológicas que mais frequentemente intervém em estudos hidrológicos em Portugal Continental é a precipitação, cujos registos, adquiridos em postos udométricos do ex-Instituto da Água (INAG), podem ser consultados no domínio de internet do Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SNIRH).

Contudo, a maior parte daqueles registos são adquiridos em postos udométricos e referem-se a precipitações diárias. Apenas os postos udométricos facultam registos de precipitação com duração inferior sendo que o número destes últimos postos é muito inferior ao daqueles outros postos. Esta circunstância levanta desde logo duas questões:

- No caso de bacias hidrográficas de pequena e média dimensão, as precipitações subdiárias são por norma as que interessam ao estudo de cheias.
- O reduzido número de postos com precipitações inferiores ao dia resulta na utilização frequente dos registos aí adquiridos para caracterizar hidrologicamente bacias hidrográficas geograficamente bastante afastadas dos pontos de monitorização, deixando aqueles registos de ser representativos dos regimes de precipitações ocorrentes nas bacias.

Posto isto, surgiu a necessidade de superar as dificuldades inerentes à rede de medição de Portugal Continental, e, de modo a avaliar melhor as precipitações máximas anuais com curtas durações, foram estabelecidas relações regionais que permitem uma estimação aproximada dessas precipitações.

Neste subcapítulo aborda-se o estudo dessas relações, nomeadamente, as curvas de possibilidade udométrica e de intensidade-duração-frequência (IDF), justificando-se a sua relevância no estudo de precipitações intensas subdiárias, em contexto de projeto.

2.3.2 Conceitos teóricos

A caracterização das precipitações intensas sob a forma líquida ou sólida está sempre condicionada por isso a fatores hidrológicos como os seguintes (F. J. P. Martins, 2000):

- *Duração* correspondente ao tempo considerado para a chuvada, que no caso de cheias de rios pode ser da ordem de grandeza de horas, ou mesmo dias, e no caso de passagens hidráulicas pode ser horas ou mesmo minutos.
- *Intensidade* correspondente à relação entre a altura de precipitação caída e a sua duração.
- *Frequência* traduzida, em geral, por uma ocorrência num determinado número de anos.

De entre os fatores que condicionam as precipitações de projeto, os fatores geométricos incluem a área, a forma, o relevo, a orientação e a densidade de drenagem na bacia hidrográfica, enquanto os fatores físicos são descritos pelo uso e tipo de solo, coberto vegetal, condições geológicas e rede hidrográfica (Pereira, 1995).

Para obter o volume e o caudal de uma cheia será necessário, após a determinação das características fisiográficas da bacia, determinar intensidade de precipitação, para uma dada duração e frequência de ocorrência, e a sua distribuição temporal (Pereira, 1995).

As relações entre a intensidade da precipitação, a duração e o respetivo período de retorno são estabelecidas como já foi referido, pelas curvas IDF, de acordo com a seguinte expressão, originalmente adotada:

$$i = \frac{aT^n}{(t_p + b)^m} \quad (40)$$

onde t_p é a duração da precipitação, i a sua intensidade média, por regra, expressa em mm/h, T o período de retorno e a , b , n e m parâmetros que são determinados a partir dos registos em postos udométricos. A partir da fórmula (40) conclui-se que conhecendo duas das variáveis (duração e período de retorno, por exemplo), é possível determinar a terceira (intensidade), desde que sejam conhecidos os parâmetros da equação.

O estudo das relações que levam à formulação de curvas IDF com a forma atualmente mais generalizada foi objeto de diversos trabalhos sobretudo anteriormente ao ano 2000. Tais trabalhos procuraram obter relações entre a precipitação associada à génese de cheias, P , a respetiva duração, t , e a frequência expressa pelo período de retorno T .

Matos (1986) obtiveram curvas IDF a partir do tratamento estatístico das séries de valores máximos da intensidade de precipitação para diferentes durações, mas sempre inferiores a 120 min, e para a mesma frequência de ocorrência. Estas curvas resultaram do ajustamento, pelo método dos mínimos

quadrados, das intensidades de precipitação correspondentes a diversas durações t , para um dado período de retorno T , de uma curva exponencial. A curva exponencial é definida por:

$$i = a't^{n'} \quad (41)$$

onde t representa a duração da precipitação e os parâmetros a' e n' são constantes definidas pelas autoras para cada região e tempo de retorno estabelecido, em anos.

As relações entre precipitações e durações são designadas por *linhas de possibilidade udométrica* ou por *curvas de intensidade-duração-frequência (IDF)* consoante fazem intervir precipitações com uma determinada duração ou intensidades médias dessas precipitações. No caso linhas de possibilidade udométrica, assumem a seguinte formulação:

$$P = at^n \quad (42)$$

onde P representa a precipitação, t a respetiva duração, enquanto os coeficientes a e n são função do período de retorno T .

Para determinar ambas as curvas para durações inferiores a um dia, é necessário dispor de udiogramas que permitam obter as alturas de chuva em intervalos de tempo inferiores a 24 h e, portanto, encontrar o valor máximo de precipitação dum acontecimento pluvioso, para qualquer duração. Assim, é possível obter séries de valores máximos e efetuar uma análise de frequência (Pereira, 1995).

2.3.3 Estudos antecedentes em Portugal Continental

Neste subcapítulo serão brevemente mencionados estudos antecedentes para Portugal Continental referentes a curvas IDF e a linhas de possibilidade udométrica sem ser explicitado o procedimento que conduziu aos resultados apresentados por cada autor.

As primeiras referências gráficas ao estudo das relações intensidade-duração-frequência de acontecimentos pluviosos em Portugal Continental foram feitas por LNEC (1976) onde são representadas isolinhas do quociente entre duas precipitações com igual período de retorno e durações diferentes, conforme se exemplifica na Figura 2.17.

Godinho (1984 1989 e 1991) também fornece isolinhas do quociente (expresso em percentagem) entre duas precipitações distintas, com a diferença que faz depender esse quociente do período de retorno a que se referem as precipitações – Figura 2.18.

O mesmo autor apresentou um estudo sobre máximos anuais de precipitação relativos a durações subdiárias, recorrendo para isso a metodologias distintas consoante a duração da chuvada era inferior a uma hora ou estava compreendida entre 1h e 24h. Na Tabela 2.2 apresentam-se as relações obtidas por Godinho (1989) para durações inferiores a 60min e de 60 min:

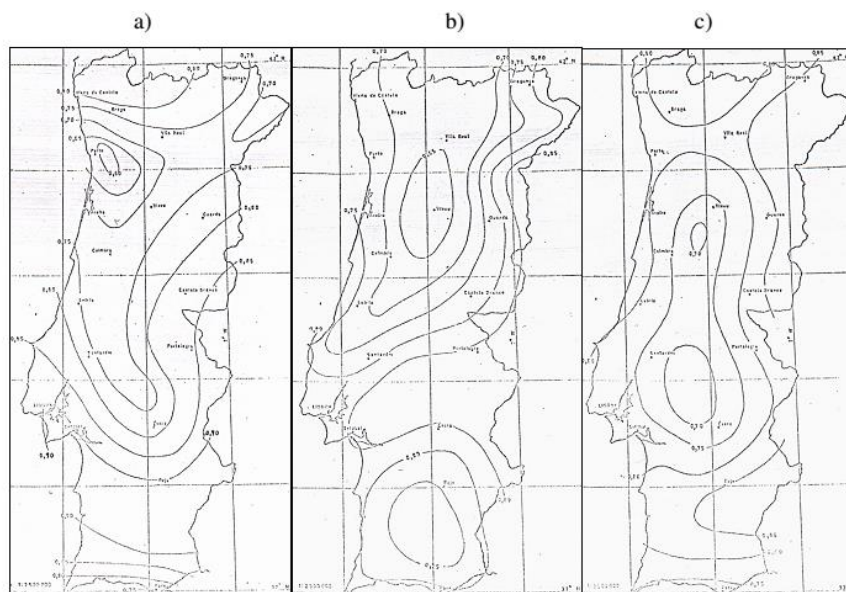


Figura 2.17- Isolinhas da relação entre precipitações com o mesmo período de retorno e durações de a)12 e 24h, b)3 e 6h e c)0.5 e 1h (adaptado de LNEC, 1976) .

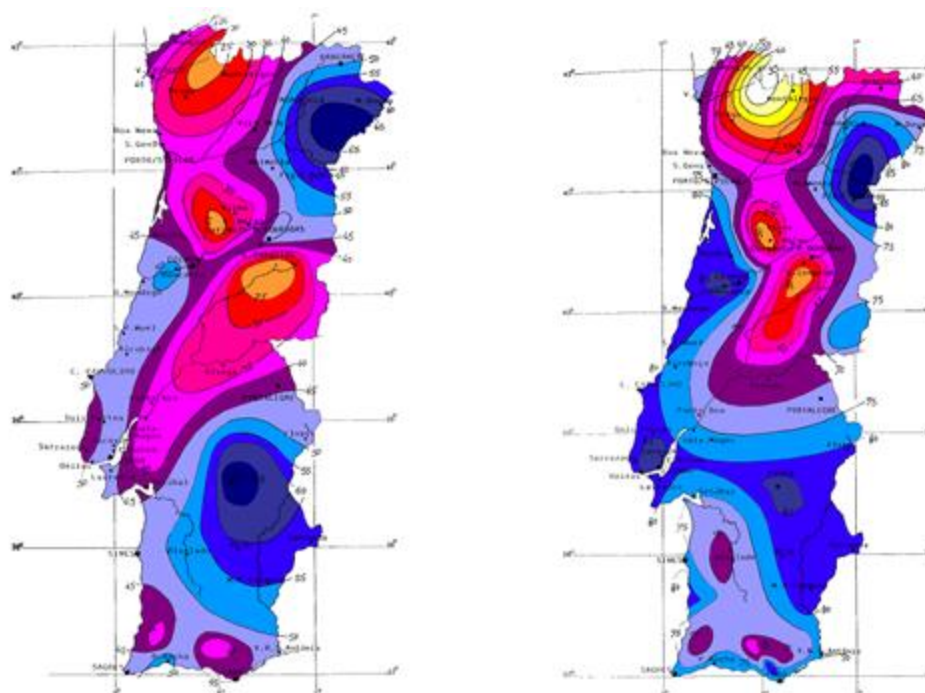


Figura 2.18- Percentagem dos máximos em 60min e 6h em função dos totais diários para um período de retorno de 1000 anos (adaptado de Godinho, (1989)).

Tabela 2.2- Relações entre os valores máximos para durações inferiores a 60 min e de 60 min (extraído de Godinho, (1984)).

Duração (min)	Relação Nacional (-)	Relação Mundial (-)
5	0.27	0.29
10	0.45	0.45
15	0.56	0.57
30	0.79	0.79

A comparação entre os trabalhos de LNEC (1976) e Godinho (1984) indica que apenas se impõe que as precipitações a que se refere cada um dos mapas tenham o mesmo período de retorno. Assim, tendo por base a Figura 2.17, considere-se, por exemplo, a precipitação máxima anual em 12h e com período de retorno de T anos na região de Bragança ou de Vila Real. O mapa indica que essa precipitação representa cerca de 75% da precipitação em 24h com o mesmo período de retorno, T, sendo tal percentagem independente de T.

Importa assinalar que as Figuras 2.17 e 2.18 mostram que a variação dos quocientes nelas representadas é, em termos espaciais, bastante gradual, ou seja, existe uma certa uniformidade espacial no que respeita ao modo como a precipitação com uma dada duração (e, eventualmente, um dado período de retorno) se reparte para durações inferiores (Portela, 2006).

O estudo das precipitações intensas geralmente não é feito de forma gráfica, mas antes tendo por base as equações que traduzem as linhas de possibilidade udométrica ou as curvas IDF uma vez aferidos os valores dos parâmetros nelas intervenientes.

Nesse sentido destacam-se os trabalhos de Azevedo (1953) onde são estabelecidos os parâmetros da linha de possibilidade udométrica da região de Lisboa com uma duração limitada a 120min, à semelhança da limitação do estudo de Matos e Silva (1986), mencionado a propósito da equação (41).

Tabela 2.3- Parâmetros a e n da linha de possibilidade udométrica proposta por Azevedo (1953) para a região de Lisboa (Portela, 2006).

Período de retorno (ano)	Parâmetros		Período de retorno (ano)	Parâmetros	
	a (-)	n (-)		a (-)	n (-)
1	3,45	0,396	25	4,63	0,506
2,5	3,75	0,427	50	4,95	0,530
5	3,99	0,451	80	5,16	0,546
10	4,25	0,475	100	5,28	0,554

Taveira (1959) realizou um estudo idêntico para a região do Porto, e Mello (1980) obteve uma expressão aplicável para a região de Évora (Torre). Em seguida apresentam-se as expressões obtidas por ambos os autores respetivamente:

$$i = \frac{1875}{(t + 10)^{0.8442}} (T - 1)^{0.1590} \quad (43)$$

$$i = \frac{1065.68 - \frac{1054}{T^{0.01}}}{t^{0.696}} \quad (44)$$

em que i (mm/h) é a intensidade da precipitação, t (min), a respetiva duração e T (ano), o período de retorno para ambas as expressões.

Taveira (1959) refere ainda que a relação entre duas precipitações com durações distintas se pode considerar constante na condição de aquelas precipitações se referirem a iguais períodos de retorno.

Lencastre (1984) apresenta as seguintes linhas de possibilidade udométrica (para P expresso em milímetros e t , em horas) definidas com base em registos de postos udométricos da então Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos (DGRAH) – linhas de possibilidade udométrica referentes a Barcelos, Penhas Douradas e Évora – ou relativos a 108 anos de medições na região de Lisboa (IGIDL) – linha de possibilidade udométrica aplicável à região de Lisboa (Portela, 2006). Os respetivos parâmetros são apresentados na Tabela 2.4.

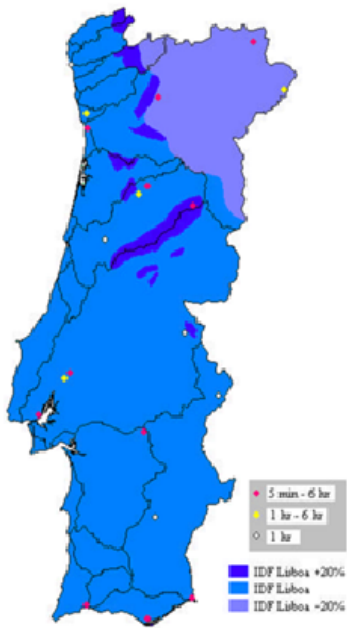
Tabela 2.4- Tempos de retorno e respetivas linhas de possibilidade udométrica para os postos estudados por Lencastre e Franco (1984) (adaptado de Portela, (2006)).

	Período de retorno (anos)		
	5	10	100
Barcelos	$P=29.0t^{0.365}$	$P=30.5t^{0.335}$	-
Penhas Douradas	$P=29.4t^{0.420}$	$P=30.4t^{0.380}$	-
Évora	$P=23.2t^{0.216}$	$P=37.6t^{0.212}$	-
Região de Lisboa	-	-	$P=52.0t^{0.62}$

Como antes mencionado, Matos (1986) propôs a adoção das curvas dadas pelas equações (41) e (42) para todo o território nacional sugerindo um agravamento em 20% das estimativas fornecidas por essas curvas em regiões montanhosas (altitude superior a 700m) e uma redução em 20% nas regiões do Nordeste de Portugal Continental – Figura 2.19.

Na Figura 2.19 representam-se as regiões pluviométricas propostas por aquelas autoras e indicam-se os valores que, em função do período de retorno, devem ser adotados nas três regiões para os parâmetros a' e n' das curvas IDF definidas pela equação (41). A intensidade média da precipitação, i , é expressa em milímetro por hora e a duração, t , em minutos. Em conformidade com as séries de precipitação utilizadas por Matos (1986) a duração t , não deverá exceder 120 min (Portela, 2006).

Posteriormente aos estudos referidos outros se sucederam, nomeadamente os de Pereira (1995) e (2001), Pereira e Hipólito (1997), e Correia (2008), que serão abordados mais aprofundadamente e adiante neste trabalho pelo facto de serem aqueles que serviram de modelo a comparativo para o estabelecimento de curvas IDF e linhas de possibilidade udométrica pelo método baseado nas SDP a que se propõe esta dissertação.



Período de retorno, T (ano)	Região pluviométrica					
	A		B		C	
	Curva IDF Lisboa		Curva IDF Lisboa - 20%		Curva IDF Lisboa + 20%	
	a'	n'	a'	n'	a'	n'
2	202,72	-0,577	162,18	-0,577	243,26	-0,577
5	259,26	-0,562	207,41	-0,562	311,11	-0,562
10	290,68	-0,549	232,21	-0,549	348,82	-0,549
20	317,74	-0,538	254,19	-0,538	381,29	-0,538
50	349,54	-0,524	279,63	-0,524	419,45	-0,524
100	365,62	-0,508	292,5	-0,508	438,75	-0,508

Figura 2.19- Regiões pluviométricas e parâmetros das curvas IDF propostas por Matos e Silva (1986) (adaptado de Portela, (2006)).

3. Séries de duração parcial. Curvas de intensidade-duração-frequência

3.1 Caracterização da precipitação de Portugal Continental

Um dos elementos mais importantes no ciclo hidrológico é a precipitação, sendo um componente essencial na definição das características hidrológicas de Portugal Continental, em grande parte explicadas pela acentuada variabilidade espacial do regime pluvioso, como ilustrado na Figura 3.1.

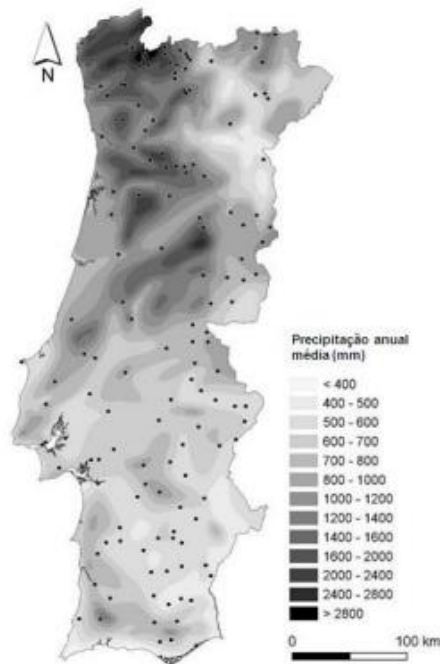


Figura 3.1- Precipitação anual média em Portugal Continental. Os pontos representam as 144 estações udométricas utilizadas (adaptado de Santos et al., (2010)).

As montanhas do Minho, Cordilheira Central e os relevos que se prolongam para sudoeste constituem uma barreira morfológica que causa precipitações de grande intensidade nas regiões de Entre-os-Rios, Lima e Cávado, sendo que na vertente atlântica apresentam valores de 2200mm de precipitação anual média podendo chegar a 4000mm na zona da Serra do Gerês. Na região a leste dos alinhamentos montanhosos do Noroeste do território, a precipitação anual média revela uma descida de 800mm para 500mm por ano nos vales do rio Douro e respetivos afluentes. Na região da Serra da Estrela verifica-se um efeito semelhante, onde há uma variação de 2000mm para 800mm por ano na zona este do alinhamento montanhoso, sendo que na região do Vale do Tejo atinge o valor de 600mm/ano. Na zona do rio Guadiana observam-se valores mais reduzidos da precipitação anual média por volta dos 570mm por ano, sendo que em algumas zonas circundantes pode até atingir valores menores que 450mm/ano. Esta região, a par da do vale do rio Coa são as que apresentam os valores mais baixos de precipitação anual média (C. M. C. Martins, 2010).

O Inverno é a estação mais chuvosa, com cerca de 42% da precipitação anual, e o Verão a menos chuvosa, com apenas 6%. A Primavera e Outono contribuem com os restantes 52% da precipitação

anual, com uma distribuição interanual muito variável. Em termos relativos, a variabilidade intraanual, mas também a interanual, aumenta de Norte para Sul (Santos & Miranda, 2006).

As alterações climáticas previstas para Portugal Continental projetam na precipitação atual uma redução na ordem dos 20 a 40% devido sobretudo à redução da estação chuvosa. Apesar de os estudos indicarem uma redução global da precipitação anual, também sugerem um aumento ligeiro da mesma no Norte e um decréscimo nas regiões Centro e Sul do país. Outra conclusão que se retira dos cenários de alterações climáticas é o aumento da assimetria sazonal da precipitação, com uma redução significativa do período de Verão (Maciel Vaz, Silva, & Nascimento Pinheiro, 2008).

De acordo com Santos & Miranda (2006), a precipitação anual média em Portugal é de cerca de 900 mm. Outras fontes indicam valores ligeiramente diferentes, citando-se, pela sua abrangência e atualidade, a estimativa de cerca de 960 mm apresentada no Plano Nacional da Água (MAOT, 2002). Já Quintela (1996) refere que a precipitação anual média em Portugal Continental atinge cerca de 1000 mm, sendo que, considerando apenas as regiões a norte do Tejo, se estima que o valor seja 1230 mm, e que, considerando apenas as regiões a sul do Tejo, este se reduza para 700 mm (Martins, 2010).

O uso de técnicas como as SDP pressupõe amostras com elevados números de registos e que sejam representativas de várias regiões de Portugal Continental devido à heterogeneidade dos fenómenos pluviosos no território. Assim, procurou-se nesta dissertação analisar postos udométricos representativos de locais distintos no que respeita ao comportamento dos fenómenos pluviosos, que disponham de dados suficientes para uma análise fidedigna com SDP e que fossem já anteriormente usados por outros autores, de modo a possibilitar uma análise comparativa com outras metodologias de análise hidrológica.

3.2 Escolha dos postos udométricos e análise de dados

A escolha dos postos udométricos a analisar constitui o primeiro passo na metodologia baseada em SDP a que se propõe esta dissertação. Na Figura 3.2 estão destacados a vermelho os postos escolhidos para análise de entre os restantes existentes no território, representados a amarelo.

A necessidade de comparação dos valores de precipitação entre os diversos locais, levou à padronização dos equipamentos de medida. Surgiram, assim, os udómetros ou pluviómetros padronizados. Estes aparelhos possibilitam a medição discreta precipitação. Estes equipamentos possuem uma superfície recetora colocada horizontalmente, e os seus modelos e modo de instalação variam consoante o país: em regra, as áreas das superfícies recetoras variam entre os 100 e 1000 cm² (por norma 200 cm² em Portugal Continental) e a altura de instalação está entre 0,3 e os 2,5 m acima do solo. São geralmente constituídos por:

- um anel circular de bordos afilados que limita a superfície de receção;
- um funil onde a proteção horizontal constitui a superfície de receção, com um orifício pequeno na parte inferior para evitar as perdas por evaporação;
- um recipiente cilíndrico graduado onde se acumula a água da chuva.



Figura 3.2- Localização esquemática sobre o mapa de Portugal Continental dos postos udométricos, destacando-se, a vermelho, os escolhidos para análise.

Para efetuar uma medição da precipitação horizontal, o equipamento de uso mais frequente é o udómetro de recipiente basculante (Figura 3.3). Apresenta na sua constituição um funil que recolhe a precipitação e encaminha-a para um sistema de báscula constituído por haste apoiada no centro formando uma espécie de balanceiro. Quando a água acumulada numa das básculas atinge 0.1mm, o peso da massa líquida aciona um mecanismo de contato magnético que fecha o circuito, despejando a água para o recipiente graduado e deixando outra báscula pronta para receber mais água proveniente da chuva.

Apresenta uma limitação relevante que se prende com o facto de o movimento basculante apenas ocorrer quando o recipiente se encontra cheio. Na maior parte dos casos haverá sempre precipitação que não será contabilizada. Igualmente estes aparelhos são tanto mais ineficientes quanto piores são as condições atmosféricas (Prata, 2012).

As medições nos udómetros começaram por ser realizadas diariamente às 9.00h por um técnico, sendo os valores registados os acumulados nas 24 horas antecedentes, medindo-se assim a precipitação diária, no período das 9:00 às 9:00 h. No caso de se pretenderem obter quantidades de precipitação acumuladas em períodos inferiores ao dia, o intervalo entre medições é encurtado.

Atualmente, com o advento das novas tecnologias, os udómetros vem munidos com sistemas de aquisição de dados (*data logger*, na literatura inglesa) que disponibilizam a informação já no formato digital, quer localmente quer remotamente, quando acoplados a um sistema de teletransmissão (rádio, telefone, GSM, satélite, etc.). Os registos podem, então ser descarregados diretamente nas bases de

dados, sem necessidade de prévio processamento. Isto permite uma maior capacidade de recolha de informação e menos falhas nos registos.

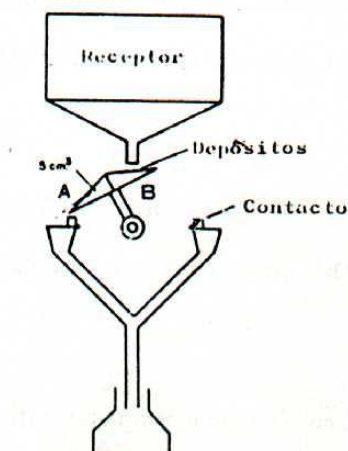


Figura 3.3- Esquema de udómetro do tipo basculante

Para a obtenção de registos de precipitação contínuos recorre-se a udógrafos que dispõem de mecanismos de registo gráfico contínuo designados por udogramas (Figura 3.4).

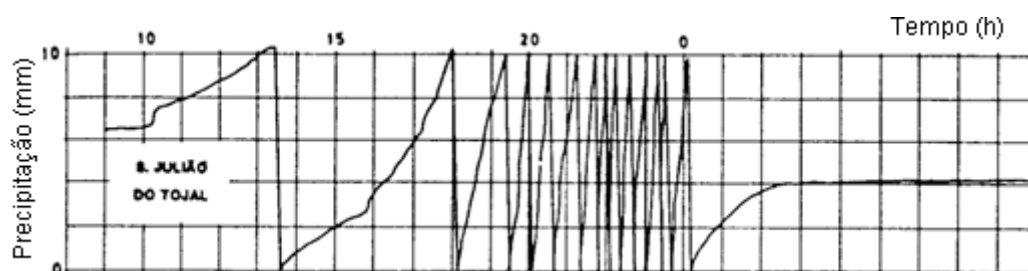


Figura 3.4- Posto de S.Julião do Tojal. Udograma referente a Novembro de 1967, obtido num udógrafo de sifão (adaptado de Lencastre, (1984))

Pretende-se, com a metodologia proposta nesta dissertação, recolher dados de precipitações com durações inferiores ou iguais a 24 horas e validar a técnica das SDP na formulação de curvas IDF, sendo que para isso se analisaram postos que dispõem de dados de precipitações horárias. A recolha de dados foi feita por consulta do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), da responsabilidade da Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

Neste sentido, importa definir, antes de mais, o conceito de ano hidrológico, que distintamente do ano civil, está compreendido entre 1 de Outubro de um dado ano e 30 de Setembro do ano civil seguinte.

Pelo fato de se analisarem precipitações horárias, ocorrem muitas vezes falhas nos registos de precipitação, o que compromete a obtenção de amostras completas para cada ano hidrológico considerado, caso não se proceda ao preenchimento dessas falhas. Na sua origem estão fatores como a falta de acesso ao posto udométrico em dias de intempérie, falta de verbas para manter o técnico em funções ou mesmo por falha do material de medição e, mais recentemente, de teletransmissão.

Na análise efetuada apenas foram utilizados anos hidrológicos completos, não necessariamente consecutivos, para o que se procedeu ao preenchimento de falhas sempre que tal foi possível. Os anos com falhas insuscetíveis de serem preenchidas (por respeitarem a períodos de tempo com duração considerável) foram eliminados

Na Tabela 3.1 sistematizam-se algumas características geográficas dos três postos analisados. Anota-se que as coordenadas cartográficas aí especificadas se referem ao sistema Hayford-Gauss Militar.

Tabela 3.1- Características geográficas dos postos udométricos selecionados para a análise SDP.

Nome do posto	Código do posto	X (m)	Y (m)	Altitude (m)	Bacia hidrográfica principal
Abrantes	17H/01C	202682	276218	105	TEJO
Monchique	30F/01C	159096	39736	792	ARADE
São Julião do Tojal	20C/01C	114090	208796	6	TEJO

Para além da dispersão geográfica, eventualmente denotando diferentes regimes pluviosos, os postos analisados foram escolhidos por apresentarem amostras o mais completas possível e permitirem alguma comparação com estudos antecedentes.

Como já foi referido, a metodologia proposta por este trabalho baseia-se em amostras de precipitações horárias para aplicação de um modelo de SDP com vista a formulação de curvas IDF para períodos subdiários que sejam fidedignas e, nalguns casos, suscetíveis de serem comparadas com trabalhos anteriores. Na Tabela 3.2 sistematizam-se algumas das características daquelas amostras.

Tabela 3.2- Características das precipitações horárias nos postos selecionados para análise e períodos de registos.

Nome do posto	Código do posto	Número de registos	Média (mm)	Valor máximo (mm)	Período de registos	
Abrantes	17H/01C	128010	0.05	23.0	Fev-2001	Out-2015
Monchique	30F/01C	128415	0.10	33.3	Jan-2001	Out-2015
São Julião do Tojal	20C/01C	115291	0.08	40.9	Mai-1998	Mai-2013

3.3 Metodologia usada para constituição das amostras

Depois de recolhidos os registos de precipitações horárias nos postos udométricos escolhidos analisaram-se as falhas tendo em vista obter amostras em anos hidrológicos completos, embora não necessariamente consecutivos. Para tal procedeu-se, em cada posto, à seguinte análise faseada, a qual precedeu o preenchimento de falhas:

- Recolha de todos os registos de precipitações horárias de modo a dispor de tanta informação quanto possível, eventualmente pertinente para o preenchimento de falhas ou para entender o regime de precipitações.
- Identificação das falhas ocorrentes.
- Eliminação de anos hidrológicos exibindo longos períodos falhas em épocas chuvosas.

- Eliminação dos anos hidrológicos com início e/ou fim de registos não coincidentes com 1 de Outubro e/ou 30 de Setembro, respetivamente.

Nas Tabelas 3.3 e 3.4 resume-se o resultado da aplicação da anterior metodologia. Observa-se que no posto de Abrantes foi removido o ano hidrológico 2009/10 dado ao elevado número de falhas que exibia.

Tabela 3.3- Dados de precipitação horária nos postos seleccionados. Falhas existentes, períodos de análise e percentagens daquelas falhas nas amostras finais.

Nome do posto	Código do posto	Dados observados		Dados considerados			
		N.º de anos hidrológicos	N.º de registos	N.º de anos hidrológicos	N.º de registos	N.º de falhas ocorrentes	Percentagem das anteriores falhas (%)
Abrantes	17H/01C	11.48	101411	10	87672	490	0.56%
Monchique	30F/01C	12.50	110432	12	105192	106	0.10%
São Julião do Tojal	20C/01C	13.05	115291	11	96432	202	0.21%

Tabela 3.4- Períodos com registos e efetivamente adotados na análise (no posto de Abrantes não se considerou o ano hidrológico 2009/10 por não ser adequado o preenchimentos de falhas com os critérios usados).*

Nome do posto	Código do posto	Período observado		Período considerado		
		Início	Fim	Início	Fim	Anos hidrológicos
Abrantes*	17H/01C	01-02-2001	30-09-2012	01-10-2001	30-09-2012	2001/02 a 2011/12
Monchique	30F/01C	31-01-2001	30-09-2013	01-10-2001	30-09-2013	2001/02 a 2012/13
São Julião do Tojal	20C/01C	05-05-1998	04-05-2013	01-10-2001	30-09-2012	2001/02 a 2011/12

3.3.1 Preenchimento de falhas de precipitação

Depois do anterior tratamento preliminar procedeu-se à análise das falhas nos registos e seu respetivo preenchimento de modo a se dispor de amostras em anos hidrológicos completas. Com essa finalidade adotam-se três critérios de preenchimento:

- Em períodos com total ausência de precipitação, adoção de precipitação horária nula ($P=0\text{mm}$).
- Preenchimento considerando uma variação linear entre os registos que imediatamente antecedem e se sucedem ao período com falhas.
- Preenchimento com base numa análise de regressão linear com registos num posto geograficamente próximo.

Como mencionado, o primeiro critério é usado em períodos sem pluviosidade, sobretudo se o número de falhas for pouco significativo. A Tabela 3.5 exemplifica a aplicação do critério em menção ao posto de S. Julião do Tojal.

Tabela 3.5- Posto udométrico de S.Julião do Tojal. Precipitações horárias de 1 a 15 de Setembro de 2006. A amarelo destaca-se o dia em que as seis falhas nas precipitações horárias foram preenchidas com precipitação nula.

Setembro de 2006				
Dia	N. valores	Min (mm)	Máx (mm)	Soma (mm)
1	24	0.0	0.1	0.2
2	24	0.0	0.0	0.0
3	24	0.0	0.0	0.0
4	24	0.0	0.0	0.0
5	24	0.0	0.0	0.0
6	24	0.0	0.0	0.0
7	24	0.0	0.0	0.0
8	18	-	-	-
9	24	0.0	0.0	0.0
10	24	0.0	0.0	0.0
11	24	0.0	0.0	0.0
12	24	0.0	0.0	0.0
13	24	0.0	0.5	1.2
14	24	0.0	0.1	0.1
15	24	0.0	0.1	0.1

Na Tabela 3.5 pode-se observar que os valores, quer mínimos e máximos das precipitações horárias, quer das precipitações diárias, são muito reduzidos ou mesmo iguais a zero o que torna adequado o preenchimento das seis falhas existentes no dia 8 de Setembro com valores nulos de precipitação. Tal preenchimento é ainda mais razoável tendo em conta que se tais precipitações não forem nulas, elas serão necessariamente muito reduzidas, logo, não interferindo na constituição das séries de duração parcial por estarem abaixo de qualquer limiar representativo de acontecimentos pluviosos extremos.

O uso deste critério teve uma maior importância no posto udométrico de Abrantes por se terem preenchido deste modo um maior número de falhas, o que permitiu a consideração de dois anos hidrológicos (2006/07 e 2007/08), que, se assim não fosse, seriam removidos por inteiro da amostra. Este caso é ilustrado na Tabela 3.6.

Relativamente ao posto de Abrantes, importa anotar que num dos três dias com falhas no mês de Setembro, um dos postos vizinhos (Gavião) registou uma precipitação elevada, embora noutra posto (Constância) a precipitação nesse mesmo dia tenha sido reduzida, conforme se sistematizou na Tabela 3.7.

Dado que estava em causa a eliminação de um ano hidrológico completo devido a três falhas diárias, e que a informação localmente disponível de certa forma também o permitia, considerou-se que nesses três dias não ocorreram precipitações de tal modo excecionais que comprometessem os resultados da análise das SDP, pelo que lhes foram atribuídas precipitações diárias e, logo, horárias nulas.

Tabela 3.6- Posto de Abrantes. Precipitações horárias nos meses de Setembro e Outubro dos anos hidrológicos de 2006/07 e 2007/08, respetivamente. A amarelo destacam-se os dias em que as falhas nas precipitações horárias foram preenchidas com precipitação nula.

Dia	Ano hidrológico 2006/07 Set-07				Ano hidrológico 2007/08 Out-07			
	N. Valores	Min.	Máx.	Soma	N. Valores	Min.	Máx.	Soma
1	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
2	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
3	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
4	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
5	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
6	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
7	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
8	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
9	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
10	24	0.0	6.3	6.3	0.0	-	-	-
11	24	0.0	1.1	1.1	0.0	-	-	-
12	24	0.0	3.3	3.3	0.0	-	-	-
13	24	0.0	0.1	0.1	0.0	-	-	-
14	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
15	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
16	24	0.0	19.3	22.9	0.0	-	-	-
17	24	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-
18	24	0.0	0.0	0.0	14.0	-	-	-
19	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
20	24	0.0	2.7	2.8	24.0	0.0	0.0	0.0
21	24	0.0	0.9	0.9	24.0	0.0	0.0	0.0
22	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
23	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
24	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.4	0.8
25	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.1	0.2
26	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.1	0.1
27	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
28	0	-	-	-	24.0	0.0	0.0	0.0
29	0	-	-	-	24.0	0.0	0.0	0.0
30	0	-	-	-	24.0	0.0	0.1	0.1
31					24.0	0.0	0.0	0.0

Tabela 3.7- Postos de Gavião e Constância. Precipitações horárias e diárias nos dias 28, 29 e 30 de Setembro do ano hidrológico de 2006/07.

Dia	Gavião (17J/01UG) Ano hidrológico 2006/07 Set-07				Precipitação diária (mm)	Constância (17G/04UG) Ano hidrológico 2006/07 Set-07			Precipitação diária (mm)
	Precipitações horárias			Precipitação diária (mm)		Precipitações horárias			
	N.º valores	Min. (mm)	Máx. (mm)			N.º valores	Min. (mm)	Máx. (mm)	
28	24	0.0	0.0	0.0	24	0.0	0.0	0.0	
29	24	0.0	3.0	6.0	24	0.0	4.6	9.5	
30	24	0.0	19.9	44.9	24	0.0	4.4	7.6	

Continuando no posto de Abrantes, tendo por base a análise da precipitação mensal e diária em postos vizinhos – designadamente nos postos de Gavião e de Constância, conforme se sistematiza na Tabela 3.8 –, mas também no próprio posto nos dias de Outubro de 2007 em que se dispõe de registos, concluiu-se que nos 18 dias iniciais daquele com falhas, dificilmente ocorreriam precipitações excepcionais que pudessem ser seleccionadas para uma amostragem de SDP, pelo que também lhes foram atribuídas precipitações nulas.

Tabela 3.8- Postos de Gavião e Constância. Precipitações horárias e diárias no mês de Outubro do ano hidrológico de 2007/08.

Dia	Gavião (17J/01UG) Ano hidrológico 2006/07 Out-07				Constância (17G/04UG) Ano hidrológico 2006/07 Out-07			
	N. Valores	Min. (mm)	Máx.(mm)	Soma (mm)	N. Valores	Min.(mm)	Máx.(mm)	Soma (mm)
1	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
2	24	0.0	0.5	0.9	24.0	0.0	3.2	5.9
3	24	0.0	0.3	1.3	24.0	0.0	0.4	1.1
4	24	0.0	0.2	0.4	24.0	0.0	0.2	0.6
5	24	0.0	0.1	0.1	24.0	0.0	0.1	0.1
6	24	0.0	0.1	0.1	24.0	0.0	0.1	0.1
7	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
8	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
9	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
10	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
11	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
12	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
13	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
14	24	0.0	0.3	0.3	24.0	0.0	0.1	0.2
15	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.1	0.1
16	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
17	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
18	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
19	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
20	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
21	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
22	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
23	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
24	24	0.0	0.2	0.3	24.0	0.0	0.5	0.8
25	24	0.0	0.1	0.1	24.0	0.0	0.1	0.1
26	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.1	0.2
27	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
28	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
29	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
30	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0
31	24	0.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	0.0

TOTAL (mm)	3.5
---------------	-----

TOTAL (mm)	9.2
---------------	-----

O segundo critério de preenchimento de falhas recorre à interpolação linear entre os dois registos imediatamente antes e depois de cada falha.

Importa neste sentido relembrar que a interpolação linear é um método que permite construir um novo conjunto de dados, a partir de um conjunto discreto de registos pontuais previamente conhecidos, através de uma função linear $p(x)$ que aproxima uma suposta função $f(x)$ que originalmente representaria as imagens de um intervalo descontínuo contido no domínio de $f(x)$. A equação que define uma interpolação linear para uma função $f(x)$ é dada por:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (45)$$

Esta metodologia aplicou-se ao preenchimento de falhas em períodos em que o pressuposto de precipitação nula não se aplicava e quando o número dessas falhas era bastante reduzido, respeitando a intervalos de tempo consecutivos também com reduzida duração, conforme se exemplifica na Tabela 3.9 tendo por base o posto de Monchique.

Tabela 3.9- Posto de Monchique. Preenchimento de falhas horárias por recurso à interpolação linear. A amarelo encontram-se destacados os valores obtidos por interpolação.

Ano hidrológico 2006/07				
	Outubro	Novembro		Janeiro
Hora/Dia	26	5	6	23
0	0.0	0.0	1.3	0.0
1	0.0	0.1	0.2	0.0
2	0.1	0.0	0.5	0.0
3	0.0	0.0	0.1	0.0
4	0.3	0.0	0.4	0.0
5	3.6	0.0	0.8	0.0
5	3.6	0.0	0.8	0.0
7	0.4	0.0	2.1	0.1
8	0.2	0.0	4.8	0.0
9	0.2	0.0	1.7	0.1
10	6.1	0.0	0.0	0.3
11	1.4	0.0	0.0	0.7
12	0.1	0.0	0.0	0.5
13	0.7	0.1	0.0	0.0
14	0.3	0.0	0.0	0.0
15	1.5	0.0	0.0	0.0
16	0.5	0.0	0.0	0.0
17	0.5	3.0	0.0	1.0
18	0.5	0.6	0.0	0.7
19	0.5	0.6	0.0	0.3
20	0.4	4.3	0.0	0.0
21	0.6	2.1	0.0	0.0
22	1.1	3.4	0.0	0.2
23	0.0	2.3	0.0	0.1

O terceiro e último critério adotado com vista à obtenção de valores para as falhas existentes usa a análise de regressão linear simples estabelecida tendo por base os registos em períodos comuns no posto com falhas e em postos vizinhos. O uso desta técnica é adequado quando o número de falhas é concentrado e elevado, ocorrendo num período mais extenso (por exemplo muitas falhas num determinado mês desse ano) e os registos, quer no posto objeto de preenchimento, quer em postos

vizinhos, indicam estar em causa precipitações não nulas. Por outro lado, refira-se a necessidade óbvia de não haver quaisquer falhas no(s) posto(s) vizinho(s) no período objeto de preenchimento.

Para averiguar em que medida uma dada estimativa do coeficiente de correlação que caracteriza a regressão linear pode ser considerada significativa calculou-se o nível de significância que lhe corresponde.

Na especificação dos níveis de significância ou dos correspondentes níveis de confiança, atendeu-se às indicações apresentadas em Yevjevich (1972) destinadas a averiguar em que medida um dado valor do coeficiente de correlação pode ser considerado significativamente diferente de zero, indiciando, como tal, a validade de uma dependência estatística entre as variáveis em presença.

Para testar se a estimativa do coeficiente de correlação com o valor r não é significativamente diferente de zero aplicou-se o teste indicado em Yevjevich (1972) que utiliza a transformação Z de Fisher dada por:

$$z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} \quad (46)$$

em que r representa o coeficiente de correlação a testar. A distribuição de z é aproximadamente normal com média μ_z e desvio-padrão, σ_z , estimados por:

$$\mu_z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho} \quad (47)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N-3}} \quad (48)$$

em que ρ é coeficiente de correlação da população e N a dimensão da amostra no posto com falhas.

Em conformidade com aquele autor, a anterior transformação adequa-se a valores de N pequenos. Não obstante, este e outros testes para o efeito aplicados, pressupõem que as variáveis a que se refere o coeficiente de correlação são normalmente distribuídas, verifica-se que tal não é a circunstância da maior parte das variáveis hidrológicas que exibem muito frequentemente assimetria significativamente diferente de zero.

Embora não seja possível avaliar com rigor o efeito da assimetria nas estimativas e na distribuição do coeficiente de correlação, nem nos testes de significância baseados na função de distribuição normal, Yevjevich (1972), refere que várias experiências para o efeito realizadas indicaram que tal efeito em pequenas amostras é diminuto.

De fato, muito frequentemente a análise de correlação é desenvolvida com o objetivo de testar se duas variáveis exibem ou não associação e não propriamente com o de determinar o grau exato dessa associação. Nesse contexto, a assimetria das distribuições das variáveis não compromete o pressuposto de variáveis com distribuição bivariada normal, nem os resultados do teste.

Uma vez que se pretende testar se um dado valor do coeficiente de correlação, r , é significativamente diferente de zero para um dado nível de significância, α , o coeficiente de correlação da população, ρ , é considerado igual a zero pelo que, conseqüentemente, também é nula a média μ_z . A hipótese de r ser não significativamente diferente de zero deve ser rejeitada para o nível de significância, α , verificando-se:

$$\left| \frac{z - \mu_z}{\sigma_z} \right| = \left| \frac{z}{\sigma_z} \right| > \phi_{(1-\frac{\alpha}{2})}^{-1} \quad (49)$$

em que, ϕ , a função distribuição de probabilidade da lei normal e ϕ^{-1} a inversa desta função. Em conformidade com o anterior teste, na Figura 3.5 estão representadas as curvas que, para níveis de significância, α , compreendidos entre 0.01 e 0.50, fornecem os valores mínimos que, em função da dimensão da amostra, N , o coeficiente de correlação, r , pode apresentar de modo a que tal coeficiente possa ser considerado significativamente diferente de zero.

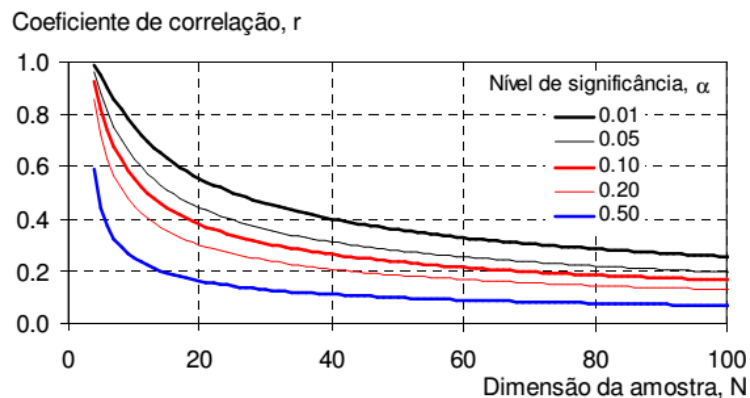


Figura 3.5- Curvas que, em função da dimensão da amostra, N , e do nível de significância, α , fornecem os valores mínimos dos coeficientes de correlação que permitem rejeitar a hipótese de tal coeficiente não ser diferente de zero (adaptado de Yevjevich, (1972)).

No presente trabalho adotam-se níveis de significância de 0.05 de modo a ser possível testar para uma maior amostra, uma gama de valores também maior do coeficiente de correlação r .

A Figura 3.6 exemplifica a análise de regressão linear simples entre precipitações horárias no posto de S.Julião do Tojal e de Caneças no mês de Abril do ano hidrológico de 2006/07.

Na Tabela 3.10 resumem-se os resultados da análise de regressão linear simples objeto da Figura 3.6.

Como se pode observar pela Tabela 3.10, o teste a que se refere a equação (5) é verificado de uma forma inequívoca já que $30.2704 \gg 1.9600$, o que revela uma correlação bastante significativa para o nível de significância definido de 5%.

Posto isto e tendo por base o posto de Caneças, procedeu-se ao preenchimento de falhas no posto de S. Julião do Tojal com recurso a equação da reta de regressão apresentada na Figura 3.6.

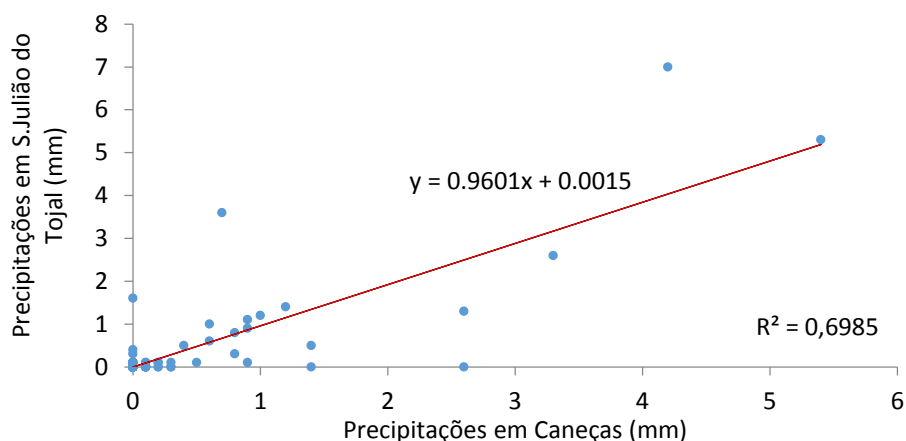


Figura 3.6– Precipitações horárias nos postos de S.Julião do Tojal e de Caneças, no mês de Abril do ano hidrológico de 2006/07. Equação de regressão linear simples e respetivo coeficiente de determinação, R².

Tabela 3.10- Dados da correlação e teste de hipóteses proposto por Yevjevich (1972) para as precipitações horárias no posto de S.Julião do Tojal e o posto vizinho de Caneças no mês de Abril do ano hidrológico de 2006/07.

Correlação		Teste de Hipóteses	
R ² (-)	0.6980	z (-)	1.2060
Coefficiente de correlação (-)	0.8355	σ_z (-)	0.0398
Ordenada na origem (-)	0.0015	z/σ_z (-)	30.2704
Declive (-)	0.9601	Nível de significância	5%
Dimensão da amostra, N (-)	633	Valor da normal reduzida, ϕ^{-1} (-)	1.9600

Após a sistematização dos períodos de análise de dados feito na Tabela 3.4, identificam-se de seguida na Tabela 3.11, as falhas que foram objeto de preenchimento por cada um dos métodos mencionados nos três postos udométricos em estudo.

Como nota, refira-se que no caso do dia 2 de Novembro do ano hidrológico de 2011/12 no posto de Monchique, apesar de as 11 falhas indicarem à partida o uso de outro método que não o da interpolação linear, pelo que já foi explicado anteriormente, a sua aplicação deveu-se ao fato de por um lado haver precipitações significativamente diferentes de zero no período envolvente (o que invalida o preenchimento com valores nulos) e por outro, não haver postos vizinhos que dispusessem de dados sem falhas no período em causa (o que não possibilitou o recurso à análise de regressão linear simples). Assim, dado que o ano hidrológico em que se inserem tem apenas 13 falhas de precipitações horárias, admite-se que o preenchimento das 11 nesse dia com recurso à interpolação linear não invalide os resultados do estudo efetuado.

Tabela 3.11- Critérios adotados para o preenchimento das falhas nos três postos udométricos utilizados no estudo (a referência a análise de regressão 1 e 2 tem a ver com o facto de se referirem a períodos distintos).

Posto	Ano hidrológico	Mês	Dia	N.º de falhas horárias	Critério de preenchimento
S.Julião do Tojal	2001/02	Out	1	10	Precipitações horárias nulas
			2	12	
		Nov	31	2	
			2	9	
			3	24	
			4	11	
			10	8	
	Set	26	4		
	2005/06	Set	8	6	
	2006/07	Abr	8	10	Análise de regressão linear simples 1 com posto de Caneças
			9	14	
			10	24	
			11	12	
12			12		
13			13		
20	2				
2007/08	Abr	18	16	Análise de regressão linear simples 2 com posto de Caneças	
2009/10	Out	3	2	Interpolação Linear	
Monchique	2006/07	Out	26	2	Interpolação Linear
			Nov	5	
		6	1		
	2008/09	Jan	23	2	
			25	2	
	2011/12	Nov	2	11	
			3	2	
	2012/13	Jan	20	4	Precipitações horárias nulas
			21	22	
			25	6	
26			20		
Mar		28	13		
		8	2	Interpolação Linear	
Set	9	16	Precipitações horárias nulas		
Abrantes	2006/07	Set	28	24	Precipitações horárias nulas
			29	24	
			30	24	
	2007/08	Out	1 a 18	418	

3.3.2 Obtenção das SDP

Depois do tratamento dos dados recolhidos nos três postos procedeu-se à sua utilização no âmbito das SDP. Para esse efeito definiram-se dois critérios:

- Seleção de acontecimentos pluviosos tais que entre cada dois consecutivos haja um período não chuvoso com duração mínima de 24h.
- Durações das chuvadas a analisar fixadas em 1h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h, 12h, 18h e 24h.

Com estes critérios espera-se, por um lado, a independência necessária entre registos para a validação da técnica das SDP e, por outro lado, com a consideração de várias durações subdiárias de eventos pluviosos, procura-se mostrar as alterações existentes nos resultados decorrentes da metodologia aplicada, assim como se consegue uma maior variabilidade de dados com durações inferiores ao dia, para a formulação de curvas IDF.

Os dados recolhidos foram organizados de modo a poderem ser lidos por um programa de cálculo automático compilado. O referido programa tem como função constituir as SDP e obter algumas das características de tais séries. Nesta dissertação não será feita referência ao código de programação, sendo apenas esclarecido o seu uso e identificados os resultados que devolve.

Para cada duração da precipitação considerada, o programa de cálculo automático tem como princípio de funcionamento o progressivo aumento dos valores dos limiares, u , com especificação para cada limiar da respetiva amostra.

Para esse efeito, há a necessidade de definir inicialmente como instrução para o programa, o número máximo de limiares a considerar, para de seguida se proceder à escolha do mais adequado conforme os critérios referidos no capítulo 2. Foi dada a indicação de um número de limiares a testar elevado, designadamente 100. Contudo, verificou-se que tal número nunca condicionou a seleção do limiar efetivamente adotado para prosseguimento da análise. Com efeito, consoante o número de ordem do limiar aumenta (do primeiro para o centésimo) a precipitação que o define também aumenta, resultando, assim, na diminuição do número de ocorrências acima desse limiar (ou seja, diminuição da dimensão das SPD). A imposição da incorporação nas SDP de pelo menos 3 acontecimentos por ano hidrológico ($\lambda > 3$), de modo tirar-se partido do acréscimo de informação proporcionado pela técnica, concretizou-se sempre para números de ordem do limiares consideravelmente inferiores a 100.

Na Figura 3.7 ilustra-se a título exemplificativo um dos ecrãs do programa de modo a obter dados relativos às precipitações com duração de 24h e respetivos limiares no posto de S.Julião do Tojal.

Refira-se que, numa etapa intermédia, o programa indica os valores máximos e mínimos diferentes de zero da precipitação com a duração indicada de modo a facilitar a eventual escolha por parte do utilizador de limiares, caso não se pretenda a sua seleção automática, o que não foi a circunstância das aplicações efetuadas.

Depois de seguidos os passos exigidos pelo programa de cálculo automático, o mesmo devolve como já referido, os resultados exemplificados na Tabela 3.12, de acordo com o mencionado no subcapítulo **2.2.3**.

```
-----
Nome do ficheiro (entre pelicas) com precipitacoes horarias em coluna
'tojal.prn'

-----
Nome do ficheiro de resultados (entre pelicas)
'precipitacao24h.res'

-----
Duracao a considerar para a serie de duracao parcial (entre 1 e 24 h)
24

-----
Intervalo de tempo (h) entre periodos com chuva (sugerido 24 h)
24

-----
Quer so um limiar/threshold - 1 - ou varios limiars/thresholds
gerados automaticamente - 2
2

-----
Valores maximo e minimo diferente de zero das precipitacoes com a
duracao indicada:      149.100000      1.000000E-01

-----
Numero de limiars/thresholds a considerar (inferior a 500)
100_
```

Figura 3.7- Execução do programa de cálculo automático para vários limiares no posto de S.Julião do Tojal para precipitações com duração de 24h.

Assim, em cada posto, após se dispor dos resultados para cada duração da precipitação procedeu-se à escolha do limiar, u , com que se prosseguiu a análise. Nesse sentido, seguiram-se as condições enunciadas no subcapítulo 2.2.4, tendo-se procurado simultaneamente obter amostras com números de excedências semelhantes por posto para, de algum modo, uniformizar as condições de aplicação das SDP.

Posto isto, com base no gráfico que relaciona os limiares com as respetivas excedências médias e limites do intervalo de confiança a 95%, escolheu-se um limiar localizado num troço aproximadamente reto (crescente, decrescente ou constante), de acordo com o critério de Davison & Smith (1990). A Figura 3.8 exemplifica a escolha do limiar ($u=15\text{mm}$) para o caso objeto da tabela anterior. Para os demais postos e durações os resultados equivalentes foram incluídos no Anexo C. Anota-se que a seleção do limiar é um processo que envolve necessariamente alguma subjetividade pois não se pode afirmar que um limiar seja mais adequado do que outro no caso de se cumprirem as condições definidas para o efeito.

Depois de definido o limiar, recorreu-se novamente ao programa de cálculo automático, repetindo o processo ilustrado na Figura 3.7, mas escolhendo a opção de “só um limiar/threshold”, cujo valor é solicitado pelo programa e introduzido pelo utilizador. Este passo encontra-se representado na Figura 3.9 e os resultados daí obtidos nas Tabelas 3.13 e 3.14.

Tabela 3.12- Resultados devolvidos pelo programa de cálculo automático para o posto de S.Julião do Tojal e duração de precipitação de 24h.

Limiar, u (mm)	Coeficientes de autocorrelação		Número de acontecimentos (-)	Número médio de acontecimentos por ano	Excedência média (mm)	Intervalo de confiança de 95% da excedência média	
	Incremento 1 (-)	Incremento 2 (-)				Limite superior (-)	Limite inferior (-)
0.10	0.091	0.037	307	27.89	13.32	15.269	11.368
1.59	0.105	0.034	214	19.44	17.44	19.880	14.991
3.08	0.073	0.025	190	17.26	18.08	20.684	15.485
4.57	0.082	0.097	175	15.90	18.10	20.804	15.387
6.06	0.038	0.075	156	14.17	18.74	21.599	15.871
7.55	0.046	0.047	150	13.63	17.96	20.880	15.038
9.04	0.132	0.057	136	12.35	18.25	21.316	15.176
10.53	0.095	0.085	129	11.72	17.71	20.865	14.557
12.02	0.111	0.137	116	10.54	18.12	21.452	14.783
13.51	0.067	0.119	107	9.72	18.08	21.556	14.600
15.00	0.050	0.123	101	9.18	17.62	21.207	14.037
16.49	0.014	0.103	97	8.81	16.83	20.500	13.166
17.98	-0.052	0.097	85	7.72	17.62	21.574	13.669
19.47	-0.042	0.097	75	6.81	18.37	22.600	14.139
20.96	-0.066	0.102	72	6.54	17.62	21.940	13.292
22.45	-0.084	0.088	68	6.18	17.12	21.584	12.646
23.94	-0.089	0.096	65	5.90	16.38	20.971	11.781
25.43	-0.015	0.079	61	5.54	15.91	20.700	11.126
26.92	-0.008	0.204	54	4.91	16.37	21.560	11.175
28.41	-0.028	0.165	47	4.27	17.20	22.880	11.515
29.90	-0.027	0.122	41	3.72	18.13	24.309	11.942
31.39	-0.027	0.122	41	3.72	16.64	22.819	10.452
32.88	0.050	-0.007	39	3.54	15.96	22.365	9.564
34.37	0.111	-0.122	36	3.27	15.73	22.512	8.939
35.86	0.080	0.125	32	2.91	16.11	23.510	8.703
37.35	0.047	0.090	30	2.73	15.66	23.431	7.898
38.84	0.000	0.071	27	2.45	15.80	24.240	7.364
40.33	-0.060	0.153	24	2.18	16.21	25.463	6.947
41.82	-0.086	0.136	23	2.09	15.38	24.967	5.796
43.31	-0.129	0.099	21	1.91	15.31	25.649	4.963
44.80	-0.129	0.099	21	1.91	13.82	24.159	3.473
46.29	-0.247	0.045	16	1.45	16.33	29.558	3.092
47.78	-0.041	-0.128	12	1.09	20.01	37.108	2.916
49.27	-0.041	-0.128	12	1.09	18.52	35.618	1.426
50.76	-0.083	-0.149	11	1.00	18.68	37.205	0.148

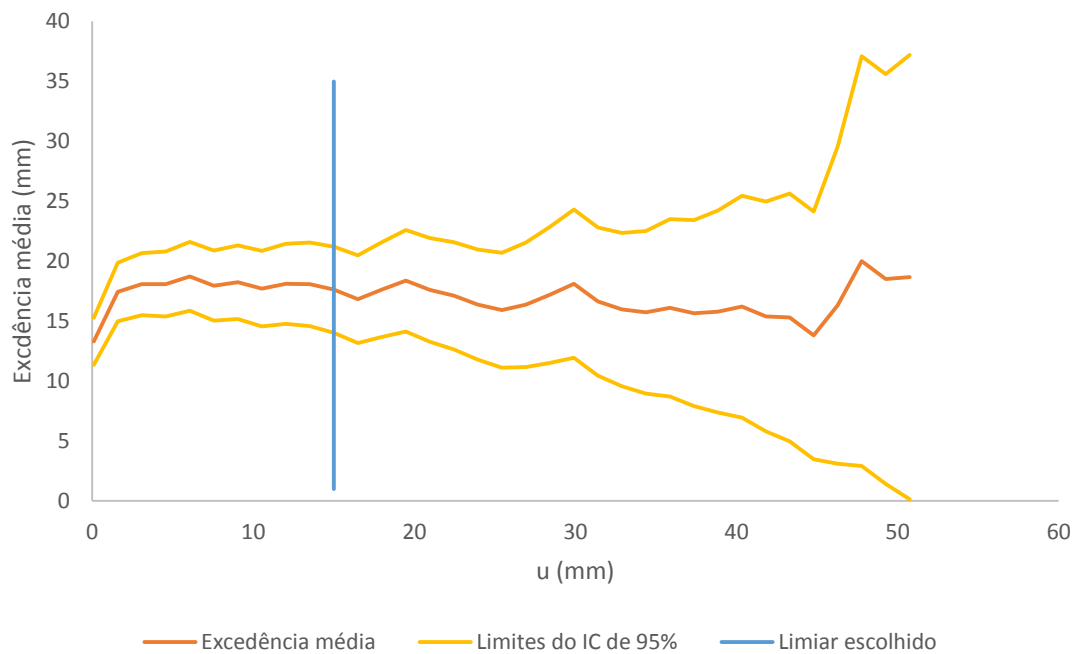


Figura 3.8- Escolha do limiar num trecho aproximadamente linear constante ($u=15\text{mm}$) para o posto de S.Julião do Tojal e duração de precipitação de 24h.

```

-----
Nome do ficheiro de resultados (entre pelicas)
'limiar24h.res'

-----
Duracao a considerar para a serie de duracao parcial (entre 1 e 24 h)
24

-----
Intervalo de tempo (h) entre periodos com chuva (sugerido 24 h)
24

-----
Quer so um limiar/threshold - 1 - ou varios limires/thresholds
gerados automaticamente - 2
1

-----
Valor do limiar/threshold?
15

```

Figura 3.9- Execução do programa de cálculo automático para o limiar selecionado ($u=15\text{mm}$) para o posto de S.Julião do Tojal e duração de precipitação de 24h.

Tabela 3.13- Amostra obtida para o limiar de $u=15\text{mm}$ no posto de S.Julião do Tojal e duração da precipitação de 24h.

Amostra de 101 precipitações em 24 h (mm)						
25.2	17.7	16.5	18.2	34.0	52.0	24.2
41.2	17.5	15.6	16.6	46.9	28.3	47.2
27.9	35.9	27.3	70.4	28.5	50.9	22.0
23.6	33.4	31.8	25.1	16.5	17.3	20.3
42.5	46.2	36.6	69.9	28.7	45.3	39.7
17.6	27.2	46.1	23.1	26.5	65.6	42.2
18.8	45.4	29.0	17.3	38.5	29.3	35.4
23.2	21.6	22.2	16.9	28.3	68.6	26.6
21.2	34.8	17.9	17.1	19.0	49.7	27.0
34.1	19.3	18.8	34.6	39.9	26.9	15.8
18.5	19.7	38.4	46.5	18.8	56.6	17.3
38.2	19.4	28.0	32.3	26.3	47.7	
29.8	35.7	56.2	25.8	20.5	26.7	
24.1	15.7	71.0	25.6	53.5	29.2	
18.7	15.4	18.7	149.1	46.1	38.9	

Tabela 3.14– Características da amostra relativa ao limiar escolhido de $u=15\text{mm}$ no posto de S.Julião do Tojal para a duração da precipitação de 24h.

Limiar, u (mm)	Coeficientes de autocorrelação		Número de acontecimentos (-)	Número médio de acontecimentos por ano (-)	Excedência média (mm)	Intervalo de confiança de 95% da excedência média	
	Incremento 1 (-)	Incremento 2 (-)				Limite Superior (mm)	Limite Inferior (mm)
15	0.050	0.123	101	9.18	17.62	21.207	14.037

Este processo repete-se para os restantes postos e durações de precipitação, sendo os seus resultados resumidos na Tabela 3.15 do subcapítulo seguinte.

3.3.3 Verificação da independência amostral das SDP

Uma vez escolhidos os limiares para as durações consideradas nos três postos udométricos analisados, importou garantir a independência estatística das amostras obtidas. Nesse sentido recorreu-se, como já referido, aos coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 que caracterizam cada amostra.

Tabela 3.15- Limiares escolhidos para os postos udométricos em estudo e respectivas durações. (Nota: "C" representa trecho linear constante, "D" descendente e "A" ascendente).

Posto	Duração (h)	Limiar escolhido (mm)	Tipo de trecho (-)	Excedência média (mm)	Número de acontecimentos, N (-)	Coeficientes de autocorrelação	
						Incremento 1 (-)	Incremento 2 (-)
Abrantes	1	3	C	3.62	113	0.058	-0.048
	2	6	A	5.09	75	0.100	-0.114
	4	7	A	6.34	86	0.142	0.008
	6	9	C	7.44	73	0.123	-0.022
	8	8	D	7.96	95	0.109	0.076
	10	8	D	8.64	98	0.076	0.078
	12	8	D	8.89	94	0.067	0.105
	18	8	D	10.87	105	0.080	0.071
Monchique	24	9	D	11.96	100	0.044	0.104
	1	3	C	5.53	199	0.059	0.016
	2	9	D	7.85	116	0.044	0.103
	4	11	C	12.12	125	0.121	0.089
	6	7	C	14.09	193	0.094	0.066
	8	9	D	15.63	177	0.109	0.030
	10	9	C	17.08	179	0.067	0.055
	12	13	C	18.29	145	0.053	0.071
S.Julião do Tojal	18	18	C	21.02	123	0.003	0.101
	24	14	D	24.17	144	0.035	0.066
	1	3	C	5.30	155	0.113	0.087
	2	4	C	7.87	153	0.079	0.099
	4	5	C	10.30	157	0.115	0.106
	6	7	C	11.72	140	0.108	0.071
	8	10	C	12.99	114	0.065	0.059
	10	11	C	14.19	111	0.103	0.061
S.Julião do Tojal	12	9	C	15.08	131	0.122	0.035
	18	13	C	16.39	106	0.114	0.096
	24	15	C	17.62	101	0.049	0.122

Uma amostra de SDP foi considerada independente uma vez que aqueles coeficientes se inseriram no intervalo de confiança de 95%. Os limites desse intervalo para diferentes dimensões de amostras, e calculados de acordo com a equação (4), são apresentados na Tabela 3.16 representada em 3.4.

Na Tabela 3.17 do subcapítulo seguinte resumem-se para os três postos e durações em estudo os resultados do teste de independência de que resultou o reconhecimento da independência temporal de todas as SDP constituídas e, logo, a validade do seu tratamento estatístico.

3.4 Modelação estatística das SDP. Estimação de quantis de probabilidade

Como foi referido em 2.2.5, a teoria dos valores extremos, indica que a distribuição GPD e a distribuição exponencial são as mais apropriadas para modelar extremos acima de um limiar, u , desde que tais extremos constituam uma variável aleatória independente e identicamente distribuída, sem tecer considerações quanto ao processo que descreve os tempos de ocorrências.

Tabela 3.16- Limites do intervalo de confiança de 95% dos coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para diferentes dimensões de amostra.

Nº de acontecimentos, N (-)	Limites do IC de 95%			
	Autocorrelação 1		Autocorrelação 2	
	Superior (-)	Inferior (-)	Superior (-)	Inferior (-)
70	0.220	-0.249	0.219	-0.251
80	0.206	-0.232	0.206	-0.233
90	0.195	-0.218	0.195	-0.219
100	0.186	-0.206	0.186	-0.207
110	0.178	-0.196	0.178	-0.197
120	0.171	-0.187	0.170	-0.188
130	0.164	-0.180	0.164	-0.180
140	0.158	-0.173	0.158	-0.173
150	0.153	-0.167	0.153	-0.167
160	0.149	-0.161	0.149	-0.162
170	0.144	-0.156	0.144	-0.157
180	0.140	-0.152	0.140	-0.152
190	0.137	-0.147	0.137	-0.148
200	0.134	-0.144	0.134	-0.144
210	0.130	-0.140	0.130	-0.140
220	0.128	-0.137	0.128	-0.137

O mais usual passa por obter um modelo de máximos anuais mediante uma análise de frequência baseada numa SMA, sendo este modelo designado pela sigla MA-SMA. No caso das SDP o processo diferencia-se pelo facto de se recorrer à equação (27) após a análise de frequência que é feita dos eventos extremos, sendo a esta metodologia atribuída a sigla MA-SDP. Na Figura 3.10 encontram-se esquematizados os dois modelos antes referidos.

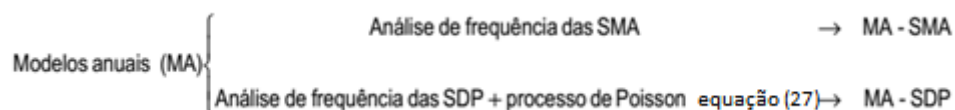


Figura 3.10- Estimação de máximos anuais de variáveis hidrológicas aleatórias (adaptado de Portela et al.,2012)

Da substituição da equação (21) na equação (27) e da equação (22) também na equação (27) resultam os seguintes dois modelos MA-SDP (Lang et al.,1999 citado por Portela et al.,2012):

- Modelo SDP com as excedências modeladas pela GPD conducente a uma distribuição generalizada de valores extremos, GEV, no campo dos máximos anuais com função distribuição de probabilidade dada por:

$$F(x) = \exp[-\lambda(1 - \xi \left(\frac{x - u}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\xi}})], \sigma > 0 \quad (50)$$

Tabela 3.17- Teste de independência estatística das SDP. A coluna “Teste de Independência” afere se os valores dos coeficientes de autocorrelação se incluem dentro dos limites inferiores e superiores.

Posto	Duração (h)	Programa SDP		Intervalos de amostra	Valores calculados				Teste independência		
		Amostra N	Autocorrelação 1		Autocorrelação 2	Autocorrelação 1		Autocorrelação 2		Autocorrelação 1	Autocorrelação 2
						Superior	Inferior	Superior	Inferior		
Abrantes	1	113	0.058	-0.048	110	0.178	-0.196	0.178	-0.197	SIM	SIM
					120	0.171	-0.187	0.170	-0.188	SIM	SIM
	2	75	0.100	-0.114	70	0.220	-0.249	0.219	-0.251	SIM	SIM
					80	0.206	-0.232	0.206	-0.233	SIM	SIM
	4	86	0.142	0.008	80	0.206	-0.232	0.206	-0.233	SIM	SIM
					90	0.195	-0.218	0.195	-0.219	SIM	SIM
	6	73	0.123	-0.022	70	0.220	-0.249	0.219	-0.251	SIM	SIM
					80	0.206	-0.232	0.206	-0.233	SIM	SIM
	8	95	0.109	0.076	90	0.195	-0.218	0.195	-0.219	SIM	SIM
					100	0.186	-0.206	0.186	-0.207	SIM	SIM
	10	98	0.076	0.078	90	0.195	-0.218	0.195	-0.219	SIM	SIM
					100	0.186	-0.206	0.186	-0.207	SIM	SIM
12	94	0.067	0.105	90	0.195	-0.218	0.195	-0.219	SIM	SIM	
				100	0.186	-0.206	0.186	-0.207	SIM	SIM	
18	105	0.080	0.071	100	0.186	-0.206	0.186	-0.207	SIM	SIM	
				110	0.178	-0.196	0.178	-0.197	SIM	SIM	
24	100	0.044	0.104	100	0.186	-0.206	0.186	-0.207	SIM	SIM	
				110	0.178	-0.196	0.178	-0.197	SIM	SIM	
Monchique	1	199	0.059	0.016	190	0.137	-0.147	0.137	-0.148	SIM	SIM
					200	0.134	-0.144	0.134	-0.144	SIM	SIM
	2	116	0.044	0.103	110	0.178	-0.196	0.178	-0.197	SIM	SIM
					120	0.171	-0.187	0.170	-0.188	SIM	SIM
	4	125	0.121	0.089	120	0.171	-0.187	0.170	-0.188	SIM	SIM
					130	0.164	-0.180	0.164	-0.180	SIM	SIM
	6	193	0.094	0.066	190	0.137	-0.147	0.137	-0.148	SIM	SIM
					200	0.134	-0.144	0.134	-0.144	SIM	SIM
	8	177	0.109	0.030	170	0.144	-0.156	0.144	-0.157	SIM	SIM
					180	0.140	-0.152	0.140	-0.152	SIM	SIM
	10	179	0.067	0.055	170	0.144	-0.156	0.144	-0.157	SIM	SIM
					180	0.140	-0.152	0.140	-0.152	SIM	SIM
12	145	0.053	0.071	140	0.158	-0.173	0.158	-0.173	SIM	SIM	
				150	0.153	-0.167	0.153	-0.167	SIM	SIM	
18	123	0.003	0.101	130	0.164	-0.180	0.164	-0.180	SIM	SIM	
				140	0.158	-0.173	0.158	-0.173	SIM	SIM	
24	144	0.035	0.066	140	0.158	-0.173	0.158	-0.173	SIM	SIM	
				150	0.153	-0.167	0.153	-0.167	SIM	SIM	
S.Julião do Tojal	1	155	0.113	0.087	150	0.153	-0.167	0.153	-0.167	SIM	SIM
					160	0.149	-0.161	0.149	-0.162	SIM	SIM
	2	153	0.079	0.099	150	0.153	-0.167	0.153	-0.167	SIM	SIM
					160	0.149	-0.161	0.149	-0.162	SIM	SIM
	4	157	0.115	0.106	150	0.153	-0.167	0.153	-0.167	SIM	SIM
					160	0.149	-0.161	0.149	-0.162	SIM	SIM
	6	140	0.108	0.071	140	0.158	-0.173	0.158	-0.173	SIM	SIM
					150	0.153	-0.167	0.153	-0.167	SIM	SIM
	8	114	0.065	0.059	110	0.178	-0.196	0.178	-0.197	SIM	SIM
					120	0.171	-0.187	0.170	-0.188	SIM	SIM
	10	111	0.103	0.061	110	0.178	-0.196	0.178	-0.197	SIM	SIM
					120	0.171	-0.187	0.170	-0.188	SIM	SIM
12	131	0.122	0.035	130	0.164	-0.180	0.164	-0.180	SIM	SIM	
				140	0.158	-0.173	0.158	-0.173	SIM	SIM	
18	106	0.114	0.096	100	0.186	-0.206	0.186	-0.207	SIM	SIM	
				110	0.178	-0.196	0.178	-0.197	SIM	SIM	
24	101	0.049	0.122	100	0.186	-0.206	0.186	-0.207	SIM	SIM	
				110	0.178	-0.196	0.178	-0.197	SIM	SIM	

- Modelo SDP com as excedências modeladas pela distribuição exponencial conducente a uma distribuição de Gumbel no campo dos máximos anuais com função distribuição de probabilidade dada por :

$$F(x) = \exp[-\lambda \exp(-\frac{x-u}{\sigma})], \sigma > 0 \quad (51)$$

Sendo que o caso particular da distribuição exponencial no âmbito da GPD é que se melhor se aplica para modelar amostras de SDP, assume-se neste contexto que o parâmetro de posição u , toma o valor do limiar selecionado e o parâmetro de forma σ assume o valor da excedência média $\overline{X_{DP}} - u$. Com isto vai-se de encontro ao critério de seleção de limiares, anteriormente usado, que refere a variação de $\overline{X_{DP}} - u$ com o limiar, u , como uma função aproximadamente linear no caso de se seguir uma distribuição GPD.

Nesse sentido, com vista à estimativa de quantis de probabilidade de base anual, com amostras de SDP, seguiu-se a seguinte metodologia:

1. Definiram-se como períodos de retorno, T , a analisar 5, 10, 100, 500 e 1000 anos;
2. Com a relação $F(x)=1-1/T$ obteve-se a frequência de acontecimentos anuais para cada período de retorno considerado;
3. Com o número médio de acontecimentos por ano, λ , para o limiar, u , de dada duração e com o valor de $F(x)$ referente a um dado período de retorno T , obteve-se $H(x)$ pela resolução da equação (27);
4. Com o valor de $H(x)$ para cada limiar e período de retorno, calculam-se os quantis de probabilidade das SDP, para o período de retorno relativo a máximos anuais de acordo com a equação (37).

A Figura 3.11 resume de uma forma simplificada a metodologia descrita:

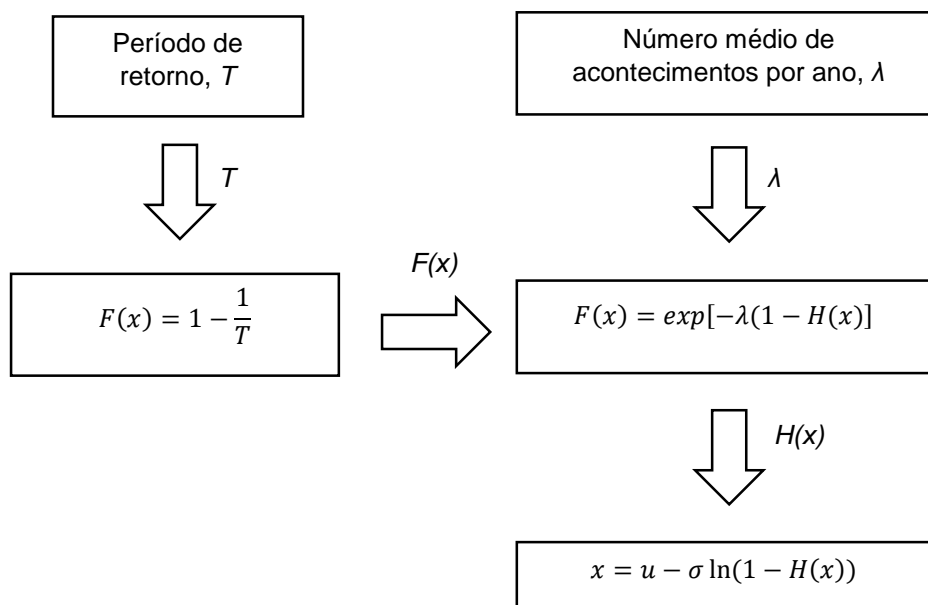


Figura 3.11- Esquema simplificado da metodologia adotada para a estimação de quantis de probabilidade das SDP, com períodos de retorno relativos a máximos anuais.

Na Tabela 3.18 apresentam-se como exemplo os resultados decorrentes do procedimento anterior para o posto de Abrantes, sendo que os referentes aos demais postos encontram-se no Anexo B.

Tabela 3.18- Quantis de probabilidade, x , para diferentes períodos de retorno estimados com base nas SDP no posto de Abrantes.

	T (anos)	F(x)	Equação H	H(x)	Estimativa x
1h	5	0.800	0.000	0.980	17.209
	10	0.900	0.000	0.991	19.927
	100	0.990	0.000	0.999	28.436
	500	0.998	0.000	1.000	34.278
	1000	0.999	0.000	1.000	36.790
2h	5	0.800	0.000	0.970	23.879
	10	0.900	0.000	0.986	27.697
	100	0.990	0.000	0.999	39.653
	500	0.998	0.000	1.000	47.862
	1000	0.999	0.000	1.000	51.392
4h	5	0.800	0.000	0.974	30.149
	10	0.900	0.000	0.988	34.907
	100	0.990	0.000	0.999	49.807
	500	0.998	0.000	1.000	60.037
	1000	0.999	0.000	1.000	64.435
6h	5	0.800	0.000	0.969	34.938
	10	0.900	0.000	0.986	40.520
	100	0.990	0.000	0.999	57.998
	500	0.998	0.000	1.000	70.000
	1000	0.999	0.000	1.000	75.159
8h	5	0.800	0.000	0.976	37.857
	10	0.900	0.000	0.989	43.832
	100	0.990	0.000	0.999	62.538
	500	0.998	0.000	1.000	75.383
	1000	0.999	0.000	1.000	80.906
10h	5	0.800	0.000	0.977	40.675
	10	0.900	0.000	0.989	47.160
	100	0.990	0.000	0.999	67.464
	500	0.998	0.000	1.000	81.405
	1000	0.999	0.000	1.000	87.399
12h	5	0.800	0.000	0.976	42.237
	10	0.900	0.000	0.989	48.906
	100	0.990	0.000	0.999	69.789
	500	0.998	0.000	1.000	84.128
	1000	0.999	0.000	1.000	90.293
18h	5	0.800	0.000	0.979	49.857
	10	0.900	0.000	0.990	58.014
	100	0.990	0.000	0.999	83.558
	500	0.998	0.000	1.000	101.097
	1000	0.999	0.000	1.000	108.637
24h	5	0.800	0.000	0.978	54.457
	10	0.900	0.000	0.989	63.430
	100	0.990	0.000	0.999	91.526
	500	0.998	0.000	1.000	110.818
	1000	0.999	0.000	1.000	119.112

3.5 Estimação de curvas intensidade-duração-frequência

Depois de estimados os quantis de precipitação com diferentes períodos de retorno, procedeu-se à estimação dos parâmetros das curvas IDF.

Dado que se dispõe de valores de precipitações e respectivas durações, logo de intensidades, toma-se a equação (42), aplicando-lhe um operador logarítmico para a linearizar e, assim, permitir a estimação dos seus coeficientes por análise de regressão linear simples:

$$i = a't^{n'} \Leftrightarrow \ln i = \ln a + n \ln t \quad (52)$$

em que se considerou $a'=a$, $n'=n$.

Em cada posto, tendo por base os quantis de probabilidade com dado período de retorno e diferentes durações, decorrentes da análise estatística das SDP, obteve-se a reta de regressão que permite estimar os valores dos parâmetros a e n das equações (42) e (9). A Tabela 3.19 e a Figura 3.12 exemplificam os resultados obtidos para o período de retorno de 5 anos no posto udométrico de Abrantes. A forma da correspondente IDF é a seguinte:

$$i = 256.684t^{-0.648} \quad (53)$$

para i expresso em mm/h e t , em minutos.

Tabela 3.19- Posto de Abrantes. Aplicação do operador logarítmico para as intensidades de precipitação obtidas da análise estatística das SDP, para o período de retorno de 5 anos.

Duração (h)	Duração (min)	Precipitação (mm)	Intensidade, i (mm/h)	Ln D (-)	Ln i (-)
1	60	17.2	17.21	4.0943	2.8454
2	120	23.9	11.94	4.7875	2.4799
4	240	30.1	7.54	5.4806	2.0199
6	360	34.9	5.82	5.8861	1.7618
8	480	37.9	4.73	6.1738	1.5544
10	600	40.7	4.07	6.3969	1.4030
12	720	42.2	3.52	6.5793	1.2584
18	1080	49.9	2.77	6.9847	1.0188
24	1440	54.5	2.27	7.2724	0.8194

Declive	-0.648
Ordenada na origem	5.5478
Coef. de correlação	-0.9992
R ²	0.9983
Exponencial	256.684

A Tabela 3.20 contem os parâmetros de todas as curvas IDF's estimadas, sendo que os quantis que lhe deram origem se encontram apresentados no Anexo B.

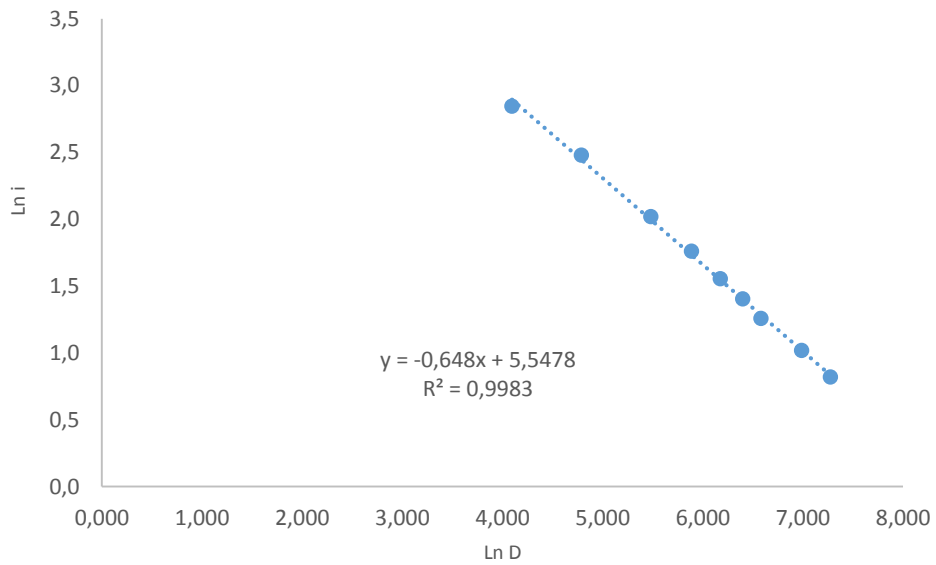


Figura 3.12– Posto de Abrantes. Correlação de valores de intensidade e duração após a aplicação do operador logarítmico para um período de retorno de 5 anos.

Tabela 3.20- Parâmetros das curvas IDF para intensidade da precipitação expressa em mm/h duração da precipitação em min, obtidas com a metodologia adotada, baseada em SDP, para os diferentes períodos de retorno nos postos udométricos em estudo.

Posto	T (anos)	Parâmetros das IDF	
		a	n
Abrantes	5	256.684	-0.648
	10	295.382	-0.647
	100	416.645	-0.644
	500	499.948	-0.643
	1000	535.767	-0.643
Monchique	5	285.426	-0.560
	10	325.717	-0.557
	100	452.147	-0.553
	500	539.074	-0.551
	1000	576.461	-0.550
S.Julião do Tojal	5	2712.453	-0.969
	10	3674.546	-0.994
	100	6987.043	-1.042
	500	9414.755	-1.060
	1000	10481.812	-1.066

4. Análise e discussão de resultados

4.1 Introdução

O objetivo da presente tese foi aplicar uma metodologia alternativa adequada à escassez de registos de precipitações subdiárias para estabelecer curvas IDF. Os procedimentos para o efeito aplicados e as expressões que definem as curvas IDF que assim se obtiveram foram objeto de capítulos precedentes. No presente capítulo procede-se à apreciação detalhada das curvas obtidas mediante a sua comparação com resultados antecedentes sobre a mesma temática.

4.2 Estudos comparativos da análise

4.2.1 Considerações breves

Como já foi anteriormente referido, o procedimento de estimação de curvas IDF e de linhas de possibilidade udométrica foi objeto de diversos estudos antecedentes em Portugal Continental. De modo a permitir uma validação da metodologia utilizada nesta dissertação, será feita primeiramente neste capítulo uma súpula dos estudos comparativos, e seguidamente uma apresentação dos resultados obtidos com a devida análise e comentário. Os referidos estudos são os de Pereira *et al.* (2001), e Correia (2008), e incluem os três postos udométricos estudados neste trabalho ou apenas alguns deles.

4.2.2 Metodologia de Pereira *et al.* (2001)

O estudo de Pereira *et al.*, (2001), pela informação reunida e pelos procedimentos aplicados constitui, porventura, a mais completa análise no domínio das precipitações intensas em Portugal Continental (Portela, 2006).

Neste documento foram apresentadas expressões que auxiliam na caracterização de precipitações intensas para diferentes durações. Foram determinadas curvas PMP (Precipitações Máximas Prováveis em função da duração), curvas IDF, relações de proporcionalidade entre precipitações acumuladas em diferentes intervalos de tempo, curvas PAD (Precipitação-Área-Duração) e hietogramas de projeto. Foram também elaborados mapas de isolinhas de valores ou de características relacionadas com a precipitação tal como se ilustra na Figura 4.1.

O trabalho desenvolvido surge como uma atualização de outros antecedentes e assenta numa base de séries anuais de precipitação recolhida para 27 postos udométricos de Portugal Continental, com uma extensão compreendida entre 22 e 56 anos, com exceção dos postos de Aveiro e Relíquias e Catraia, com apenas 15 e 13 anos respetivamente, e Lisboa, com 132 anos. São analisadas séries de precipitação com pelo menos 20 anos, com exceção da de Relíquias e Aveiro.

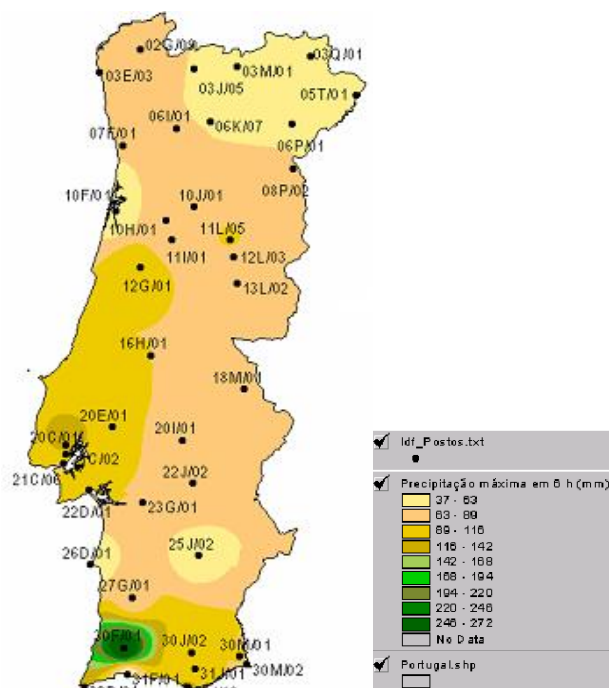


Figura 4.1- Mapa de isolinhas de precipitação obtido por Pereira et al., (2001), para a duração de 6h.

Com o objetivo de determinar as curvas IDF, aplicou-se a 27 postos udométricos a metodologia estabelecida em Pereira (1995) e inicialmente usada em nove postos (Pereira & Rodrigues, 1998). A metodologia é baseada na utilização de meios informáticos, que possibilitam a análise automática dos udiogramas digitalizados. Na Tabela 4.1 resumem-se os períodos de análise para os postos considerados no estudo.

Tabela 4.1- Rede udométrica analisada por Pereira et al. (2001).

Códigos	Posto udométrico	Período digitalizado	Período analisado	Tamanho da série analisada	Altitudes (m)
02G/09	Casal Soeiro		1960-1991	25	95
05T/01	Miranda do Douro		1951-1997	40	693
03M/01	Chaves		1931-1972	34	340
03E/03	Viana do Castelo		1963-1996	33	16
10F/01	Aveiro (Universidade)		1980-1995	15	5
10H/01	Caramulo		1937-1993	40	818
11I/01	Sta Comba Dão	1932-1992	1997-2001	56	246
11L/05	Penhas Douradas		1941-1997	54	1380
12L/03	Covilhã	1943-2001	1943-1996	43	745
12G/01	Coimbra (IG)**		1935-1966	31	141
13L/02	Gralhas	1946-1981		32	910
21C/06	Lisboa (IGIDL)	1972-1992	1860-1992	88 a 132	77
21C/02	Lisboa (Portela)		1947-1984	25	103
20C/01	S. Julião do Tojal		1957-1992	34	13
18M/01	Portalegre		1959-1997	38	596
20I/01	Pavia		1959-1995	35	192
22J/02	Evora-Cemitério		1940-1992	52	309
25J/02	Beja		1956-1997	41	246
26D/01	Sines		1970-1996	22	15
27G/01	Relíquias		1981-1995; 1997/98	13	230
30J/02	Catraia *		1959-1974	15	420
31J/01	S. Brás de Alportel *		1942-1989	47	325
30M/01	Figueirais *		1945-1981	36	82
31F/01	Praia da Rocha		1941-1996	52	21
30F/01	Monchique		1933-1935; 1948-1982; 1997/98	33	465
31J/02	Faro-Aeroporto		1943-1996	51	8
30M/02	Vila Real de Sto António		1949-1997	47	7

* Digitalização não sistemática (DNS); ** Digitalização sistemática discreta (passo de 1 h)

De uma forma sucinta seguem-se os passos que estiveram na base do método utilizado no trabalho para o estabelecimento de curvas IDF (Pereira et al., 2001):

- Aquisição de dados pluviométricos por digitalização dos udiogramas diários dos postos selecionados.
- Determinação dos valores máximos de precipitação em durações de 5, 10, 15 e 30 min e em 1, 2, 6, 12, 24 e 48 h, por cada ano. Este procedimento permite obter séries de valores anuais de intensidade de precipitação máxima, para cada um dos dez valores de duração.
- Análise estatística exploratória das dez séries, que inclui a estimação de vários descritores estatísticos (média, desvio-padrão, coeficiente de assimetria e coeficiente de achatamento), bem como o ajuste da função densidade de probabilidades de extremos tipo I (lei de Gumbel), às séries de valores de intensidade de precipitação máxima para cada uma das durações. A estimação dos valores dos parâmetros da distribuição de Gumbel foi realizada com o método da máxima verossimelhança enquanto a avaliação da qualidade do ajuste foi realizada com o teste de Kolmogorov-Smirnov (KSteste)⁴ bem como dos gráficos Quantil-Quantil ou de probabilidade.
- Determinação das intensidades de precipitação associadas a oito períodos de retorno (2, 5, 10, 50, 100, 500 e 1000 anos) para as várias durações recorrendo à função de distribuição de probabilidade de extremos tipo I.
- Representação gráfica para cada período de retorno, das intensidades de precipitação (mm/h) em função da duração da precipitação (min) cujo estudo sugeriu, tal como indicado em Pereira (1995), que a relação entre estas duas grandezas associadas a um determinado período de retorno é do tipo potencial ($i=a^t^b$) Foi ainda verificado que existe uma ligeira alteração na evolução da intensidade de precipitação aquando das durações de 30 minutos e 6 horas. Neste sentido, foi considerado conveniente realizar a estimação dos valores dos parâmetros a e b , da lei de potência, para todas as durações e para três trechos distintos: o primeiro entre 5 e 30 minutos, o segundo entre 30 minutos e 6 horas, e o terceiro entre 6 e 48 horas.
- Tal como se mostra em Pereira (1995) as curvas do tipo potencial ($i=a^t^b$) são as que melhor se adaptam à relação entre a intensidade de precipitação e a duração para um dado período de retorno, sendo a e b parâmetros resultantes do ajustamento entre as intensidades de precipitação e as durações (associada a um período de retorno) pelo método dos mínimos quadrados.

A análise estatística, a aplicação dos testes de adaptabilidade, os cálculos dos desvios quadráticos e a adaptação à curva do tipo $i=a^t^b$ foram efetuados recorrendo a um programa de cálculo automático designado IDF, sendo o seu uso explicitado no mesmo estudo. No Anexo A

⁴ O teste Kolmogorov-Smirnov consiste em aceitar ou rejeitar a hipótese de adequação do ajuste da função de distribuição de Gumbel às séries dos valores de intensidade máxima de precipitação para cada uma das dez durações, consoante a diferença entre os valores observados e ajustados seja inferior ou superior ao valor crítico para o intervalo de confiança (de 95%, neste caso).

apresentam-se os valores dos coeficientes a e b para cada trecho, período de retorno e posto udométrico analisado, assim como as respetivas curvas IDF obtidas.

Depois de estimadas as curvas IDF, concluiu-se que em Portugal Continental o quociente entre duas precipitações intensas com diferentes durações mas com igual período de retorno é praticamente constante e, portanto, independente desse período, desde que se fixe uma daquelas durações.

Os autores referem ainda que os valores extremos de precipitação em Portugal, para durações entre 5 min e 48 h, são consideravelmente inferiores aos registados na maioria dos locais, notando-se uma diferença mais acentuada para as durações superiores a 6 h, consequência dos processos de precipitação característicos de cada região. Esta discrepância justifica a caracterização e o desenvolvimento de ferramentas específicas para Portugal de forma a poderem ser utilizadas no dimensionamento e planeamento de obras hidráulicas.

Posteriormente, foram determinadas as precipitações máximas prováveis (quantidade máxima de precipitação fisicamente possível de ocorrer para uma dada duração sobre uma região num dado período do ano) com base nas mais elevadas precipitações históricas registadas para as várias durações e para dezanove postos udométricos considerados.

Nos subsequentes capítulos do estudo em apreciação são apresentadas as relações entre as precipitações subdiárias e diárias para vários períodos de retorno (bem como os respetivos mapas de isolinhas), as relações entre precipitações subhorárias e horária para vários períodos de retorno, as relações entre a precipitação anual máxima em 24h e a diária (ocorrida entre as 9h de um dia e as 9h do dia seguinte) sendo que a estas abordagens de desagregação estão associados erros de estimativa, cujo valor está dependente do tipo de fenómeno meteorológico associado à ocorrência da intensidade máxima de precipitação. São ainda obtidas curvas precipitação-área-duração (PAD) e hietogramas de projeto (que indicam como a precipitação de um dado acontecimento pluvioso intenso poderá estar distribuída ao longo do tempo). O estudo termina com a análise dos resultados, as conclusões e os trabalhos futuros.

4.2.3 Metodologia de Correia (2008)

O estudo de Correia, (2008), teve por objetivo desenvolver uma metodologia expedita, que permitisse o cálculo em qualquer local de Portugal Continental de precipitações máximas com diferentes durações e períodos de retorno.

Foram analisados 791 postos udométricos do território nacional tendo sido recolhidos aproximadamente nove milhões de registos de precipitação, obtidos a partir da base de dados na internet do SHIRH, organizados de acordo com a variável hidrológica em análise:

- Precipitação diária: 8271815 valores diários, registados em 652 postos.
- Precipitação diária máxima anual: 29864 registos, observados em 714 postos.
- Precipitação anual: 35259 registos, correspondentes a 791 postos.

- Precipitação horária: 809120 registos, observados em 20 postos.

A metodologia adotada no estudo com vista à estimação de curvas IDF compreendeu os seguintes passos (M. G. P. Correia, 2008):

- Recolha e análise da qualidade de dados. No final do processo selecionaram-se 453 postos com pelo menos 20 anos de registos diários de boa qualidade.
- Cálculo para todo o país das precipitações máximas com 1, 2, 3 e 4 dias de duração e com o período de retorno de 10 anos.
- Transformação das precipitações recolhidas em precipitações máximas com durações de 24, 48, 72 e 96h, mediante a aplicação de fatores de correção apropriados e elaboração de mapas de precipitação máxima sobre o território nacional.
- Análise preliminar dos dados disponíveis e de estudos antecedentes que conduziu à hipótese, objeto do mesmo estudo, de que, para um dado local e período de retorno de 10 anos, a precipitação máxima num dado intervalo de tempo t pode ser dada por uma equação do tipo $P=at^b$, em que a e b são parâmetros característicos do local.
- Determinação das precipitações máximas com durações intermédias entre 0 e 96h com recurso aos valores de precipitações máximas em 24, 48, 72 e 96h (sempre para $T=10$ anos) e determinação, para cada local, do coeficiente a e b que permitem estimar as precipitações máximas para diferentes durações. Os estudos realizados permitiram verificar que as estimativas de a e b baseadas nas precipitações máximas em 24 e 48h conduzem geralmente a boas estimativas das precipitações máximas para durações compreendidas entre 0 e 96h.
- Determinação das precipitações máximas para períodos de retorno diferentes de 10 anos, mediante multiplicação de $P=at^b$ por um coeficiente c , função do período de retorno T .

A localização geográfica dos 453 postos udométricos encontra-se esquematizada na Figura 4.2.

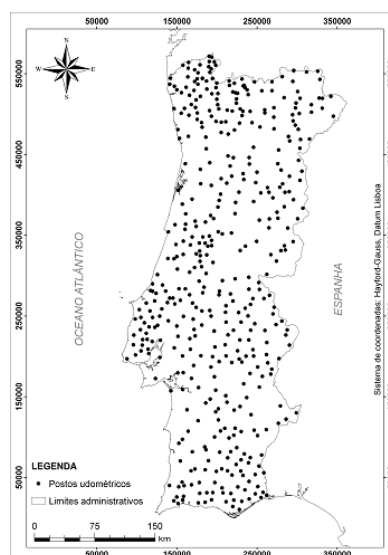


Figura 4.2- Localização dos 453 postos com mais de 20 anos de registos de precipitação diária. (retirado de Correia, Portela, & Morais, (2010))

Como resultado da metodologia aplicada, é proposto pela investigação que a precipitação máxima com duração t (em dias) e período de retorno (anos) em qualquer local do território continental português possa ser estimada mediante a aplicação do seguinte conjunto de equações:

$$\begin{cases} P_{t,T} = a t^b c \\ c = f(T) = c_1 + \frac{1 - c_1}{2.303} \ln(T) \end{cases} \quad (54)$$

em que a e b são parâmetros característicos do local e c é um parâmetro que depende do local e do período de retorno, T . A expressão anterior é aproximadamente válida para valores de t entre alguns minutos e alguns dias e para quaisquer valores de T , podendo os parâmetros a , b e c ser estimados a partir da análise de valores diários de precipitação.

Para o local em consideração, o parâmetro a é igual à precipitação máxima diária com o período de retorno de 10 anos, podendo ser também obtido através de um mapa de isolinhas dessa precipitação (M. G. P. Correia, Portela, & Morais, 2010).

As anteriores equações assentam no princípio de que as linhas de possibilidade udométrica em cada posto podem ser aproximadamente consideradas como constantes sendo por isso o parâmetro b quase independente do período de retorno considerado. Deste modo, concluiu-se que é possível caracterizar geograficamente tal parâmetro mediante a obtenção de um mapa de isolinhas do seu valor.

O coeficiente c obtém-se mediante a aplicação da segunda equação do sistema (54) e resulta do desenvolvimento do método proposto pelo NERC (Natural Environment Research Council) (1975) e referido na investigação, aplicado às séries de duração parcial. Para a aplicação deste método torna-se desnecessário preencher as falhas dos registos de precipitação diária, o que constitui uma enorme vantagem. Não é necessário o preenchimento de falhas porque se considera que tais falhas não estão diretamente relacionadas com a ocorrência de fenómenos extremos de precipitação, devendo-se antes a falhas de leitura ocasionais (erros humanos, problemas técnicos de diversa ordem), o que as torna irrelevantes para a análise de precipitações máximas (M. G. P. Correia, 2008).

O parâmetro c_1 relaciona-se diretamente com as amostras de precipitação e a sua caracterização espacial encontra-se também representada sob a forma dum mapa de isolinhas.

No Anexo A encontram-se representados os 3 mapas de isolinhas referentes aos parâmetros a , b e c_1 , necessários para a aplicação do sistema (54).

O estudo tem como pressuposto inerente que as linhas de possibilidade udométrica estabelecidas com base em precipitações extremas com durações de 1 a 4 dias são aplicáveis a durações inferiores às consideradas na sua dedução, sendo que de tal se infere que utilização das equações do sistema (1) quando estão em causa durações inferiores ao dia é adequada.

É também referido que aplicação do sistema (54) conduz a estimativas de precipitações intensas superiores às que decorreriam da utilização de linhas de possibilidade udométrica convencionais uma vez que no estabelecimento dos valores dos parâmetros *a* e *b* se utilizaram precipitações máximas relativas a períodos de registo não necessariamente com início às 9:00 h.(M. G. P. Correia *et al.*, 2010).

4.3 Apresentação e comparação de resultados. Conclusões

Os resultados devolvidos pela metodologia proposta neste trabalho serão apresentados neste subcapítulo de uma forma essencialmente gráfica, pois julga-se ser a mais adequada com vista a sua eficiente compreensão e análise. O estudo comparativo efetuado considerou apenas as curvas IDF e não as de possibilidade udométrica por uma questão de opção, uma vez que os dois modelos são perfeitamente equivalentes.

Dado que se tem como premissa que os resultados devem poder ser comparados com investigações anteriores, a formulação dos mesmos está intrinsecamente condicionada a tais estudos. Assim, desde logo importa referir que dos três postos udométricos estudados, o de Abrantes tem a particularidade de não ter sido analisado no estudo de Pereira *et al.* (2001), embora o tenha no de Correia (2008). Os postos de Monchique e S.Julião do Tojal são, por seu lado, parte integrante das já referidas investigações antecedentes.

No que respeita à compatibilização das curvas IDF, observa-se que Pereira *et al.* (2001) conforme enunciado em **4.2.2** dividem as durações dos acontecimentos em três trechos com parâmetros distintos, o que leva a adotar um procedimento similar para uma possível compatibilização de resultados. Dado que as durações dos acontecimentos pluviosos considerados na metodologia proposta neste trabalho estão compreendidas entre 1 e 24h, apenas se avaliam dois trechos de entre os propostos aqueles autores: entre 30min e 6h e entre 6 e 48h. Este facto implica que haja uma ligeira alteração no descrito em **3.5**, onde a linearização feita com vista a estimação de curvas IDF, passa a ser efetuada em dois trechos – um primeiro em que se consideram durações de 1 a 6h e um segundo com durações compreendidas entre 6 e 24h – tendo necessariamente duas curvas IDF com parâmetros distintos mas compatíveis com os estudos de Pereira *et al.* (2001).

A consulta dos valores numéricos obtidos nos estudos de Correia (2008) e Pereira *et al.* (2001), para os parâmetros das curvas IDF utilizou tabelas aí apresentadas em detrimento óbvio do recurso a eventuais representações gráficas (por exemplo, mapas de isolinhas dos valores daqueles parâmetros).

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam-se os valores dos parâmetros das curvas IDF obtidos pelos autores em menção para os três postos udométricos analisados na presente investigação, para diferentes períodos de retorno.

Tabela 4.2- Parâmetros das curvas IDF obtidas por Correia (2008) para os postos udométricos analisados.

Posto	Parâmetros das IDF (-)		
	a	b	c1
Abrantes	68.3	0.38	0.57
Monchique	146.8	0.25	0.55
S.Julião do Tojal	86.0	0.28	0.57

Tabela 4.3- Parâmetros das curvas IDF obtidas por Pereira et al., (2001) para os postos udométricos analisados.

Posto	T (anos)	Parâmetros das IDF (-)			
		Duração de 30min a 6h		Duração de 6h a 24h	
		a	b	a	b
Monchique	5	312.01	-0.509	1587.20	-0.785
	10	361.22	-0.491	2342.80	-0.810
	100	522.31	-0.463	4953.70	-0.848
	500	635.09	-0.454	6783.50	-0.860
	1000	683.80	-0.451	7594.20	-0.864
S.Julião do Tojal	5	238.70	-0.544	812.46	-0.753
	10	265.17	-0.525	1122.70	-0.770
	100	355.32	-0.493	2147.20	-0.797
	500	419.64	-0.482	2872.40	-0.807
	1000	447.56	-0.479	3186.90	-0.810

Posto isto, apresentam-se de seguida, as curvas IDF obtidas pelos já referidos autores assim como as decorrentes da metodologia sugerida neste trabalho.

A análise comparativa será feita por posto udométrico e cada período de retorno considerado, sendo que se inicia com o posto de Abrantes para o qual apenas se dispõe dos resultados de Correia (2008), como antes mencionado (Figura 4.3).

Em Abrantes observa-se uma grande proximidade entre as curvas IDF obtidas pelo método proposto por esta dissertação e as de Correia (2008), sendo que tal se verifica para todos os períodos de retorno analisados. Tal facto pode ser em parte explicado por ambos os estudos terem utilizado uma metodologia próxima, baseada em séries de duração parcial de precipitações horárias, sustentada em ampla informação, o que confere às estimativas robustez: 87672 registos considerados neste trabalho e 50696, no estudo de Correia (2008). Anota-se que os períodos analisados foram também parcialmente coincidentes: na presente investigação, entre 01/10/2001 e 30/09/2012 e naquele outro caso, entre 01/03/2001 e 07/02/2007).

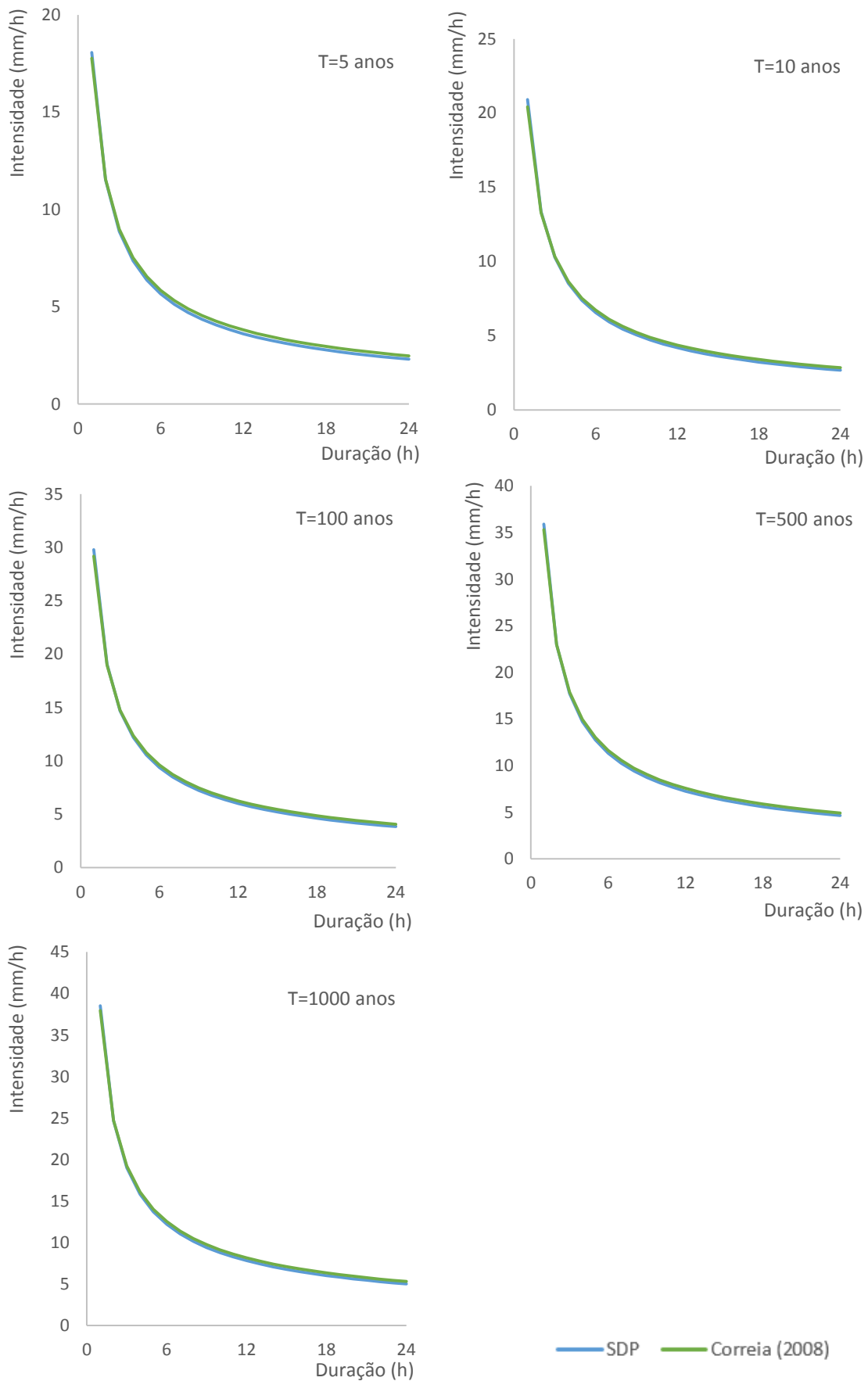


Figura 4.3- Curvas IDF obtidas para o posto de Abrantes para os diferentes períodos de retorno e curvas antecedentes de Correia (2008).

Para além da observação direta das curvas IDF deste posto em comparação com as do estudo antecedente, nota-se também que a média das diferenças médias entre valores de intensidade de precipitação (por diferença média entende-se o quociente entre o módulo da diferença entre dois valores e a média desses dois valores) é aproximadamente 4%, sendo que para cada duração considerada nunca ultrapassa 8% de diferença média entre estimativas. Com isto pode-se afirmar que a metodologia proposta pode ser aplicada neste posto com segurança para qualquer duração subdiária e período de retorno.

No que ao posto de Monchique diz respeito, ilustram-se na figura de seguida os resultados obtidos Figura 4.4.

Em Monchique destaca-se, ao contrário de Abrantes, uma diferença significativa entre curvas IDF agora obtidas e curvas antecedentes. Refira-se também que a consideração de dois trechos para a compatibilização com o método de Pereira *et al.* (2001), acaba por ser pouco relevante na comparação já que a curva daí resultante, como seria de esperar, se aproxima da que apenas considera um trecho único.

A Figura 4.4 mostra que as diferenças entre resultados dos vários autores são muito mais evidentes para durações inferiores a 12h atenuando-se consoante a duração se aproxima das 24h, especialmente para os menores períodos de retorno. Tal diferença está também patente entre os resultados de Pereira *et al.* (2001) e Correia (2008). Uma vez que à exceção das durações muito pequenas, os resultados de Pereira *et al.* (2001) são superiores aos de Correia (2008) e, como tal, superiores aos agora obtidos, há de algum modo a sugestão de que o ajustamento estatístico efetuado por aqueles primeiros autores tenha conduzido à sobreavaliação das precipitações excecionais.

A diferença entre os resultados agora alcançados e os de Correia (2008) designadamente para as menores durações pode indicar que a escolha dos limiares para essas durações, não obstante ter verificado os critérios para o efeito aplicáveis, levou à seleção de precipitações não tão excecionais quanto as que constituíram as amostras analisadas pelos demais autores.

A este propósito, importa mencionar que a quantidade de informação incorporada por cada um dos três estudos em comparação foi consideravelmente distinta, o que certamente contribuiu para as diferenças entre resultados: 105192 registos no presente estudo, 52249 no de Correia (2008) e 12045 no de Pereira *et al.* (2001) . Refira-se ainda que a investigação de Pereira *et al.* (2001), adotou um período de análise temporalmente mais recuado (anos hidrológicos entre 1933/34 e 1997/98) podendo dar-se o caso de, no entretanto, ter ocorrido alguma mudança no regime pluvioso.

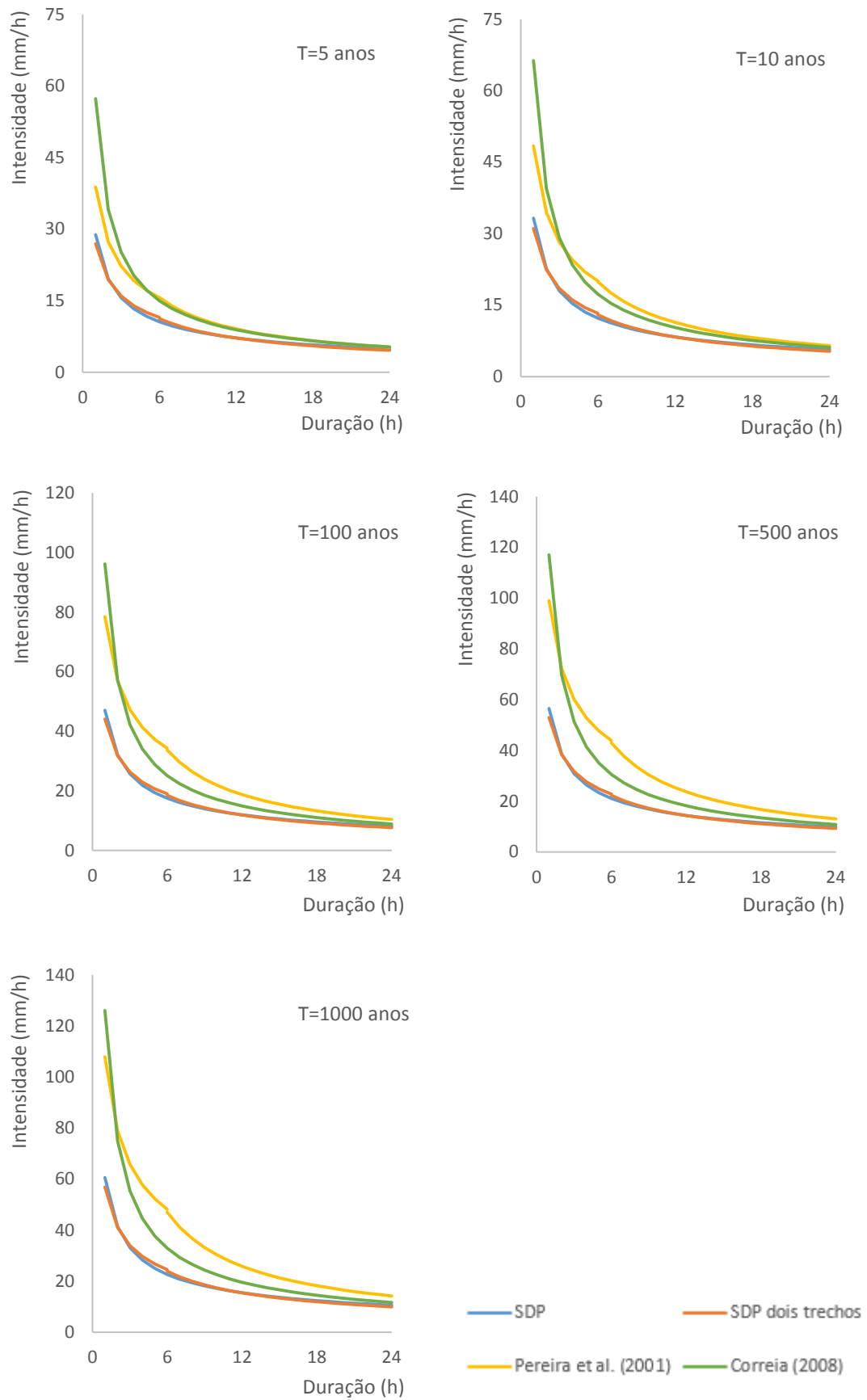


Figura 4.4- Curvas IDF obtidas para o posto de Monchique para os diferentes períodos de retorno e curvas antecedentes de Pereira et al. (2001) e Correia (2008).

Analisando novamente as médias das diferenças médias entre valores estimados observa-se que para períodos de retorno até 10 anos, os valores variam entre 25 e 32% em ambos os estudos verificando-se que para períodos de retorno superiores, tais valores sofrem um aumento substancial até aproximadamente 51% (com T=1000 anos) na consideração dos valores de Pereira *et al.* (2001), enquanto na analogia com o outro estudo as variações são pouco significativas. Tal seria de esperar dada a crescente incerteza nas estimativas que se verifica à medida que se aumentam os períodos de retorno.

Verifica-se também que para qualquer período de retorno e durações mais curtas, as diferenças médias entre estimativas são bastante elevadas o que indica novamente que neste posto a metodologia carece de aprofundamento para acontecimentos pluviosos mais curtos.

Os resultados referentes ao posto de S.Julião do Tojal são apresentados na Figura 4.5.

No posto de S. Julião do Tojal as curvas IDF apresentam andamentos próximos para períodos de retorno até 100 anos e durações superiores a 6h. Para períodos de retorno de 500 e 1000 anos a correspondência é mais acentuada apenas para durações superiores a 12h. A “descolagem”, relativamente às demais curvas, das propostas por Pereira *et al.* (2001) à medida que o período de retorno aumenta (com exceção das durações muito pequenas) sugere, mais uma vez que o tratamento estatístico efetuado por aqueles autores possa ter resultado a sobreavaliação das precipitações intensas com maiores durações. Não deixa de ser interessante observar que a metodologia aplicada conduz às mais elevadas estimativas da intensidade da precipitação para durações inferiores a 6 h.

Se forem excluídas as curvas de Pereira *et al.* (2001) verifica-se que, a partir das 6h, existe uma grande proximidade entre as IDF agora obtidas e as de Correia (2008). A discrepância existente para durações inferiores a 6h pode ser justificada pela escolha de limiares para tais durações.

Da análise das curvas obtidas por Pereira *et al.* (2001), verifica-se, ao contrário do posto de Monchique, uma maior correspondência entre curvas sobretudo para períodos de retorno até 10 anos, como comprova média das diferenças médias entre estimativas que não ultrapassa os 32%. Ainda assim, sendo um valor elevado, tal deve-se sobretudo à disparidade maior que existe nas durações de 1h a 6h, onde as estimativas obtidas pela presente investigação superam bastante os valores dos autores. Razões como a diferença nas metodologias utilizadas, e períodos de análise distintos podem justificar as disparidades existentes.

Apesar das diferenças observadas, considera-se que o estudo feito neste posto pode constituir uma alternativa com vista à obtenção de curvas IDF credível por devolver resultados que para a maioria das durações e períodos de retorno em considerados, se aproxima dos estudos antecedentes de referência a esta dissertação.

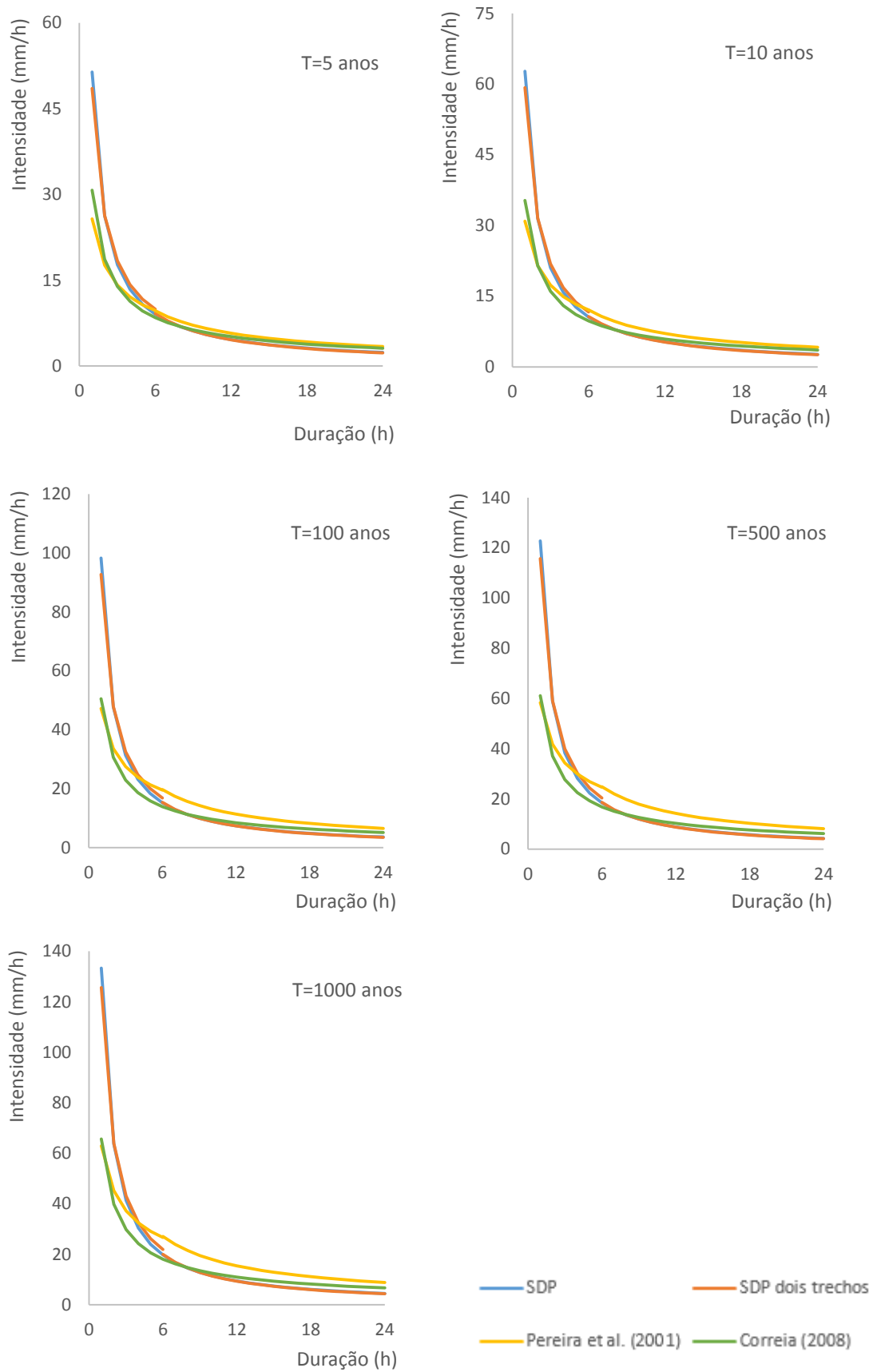


Figura 4.5- Curvas IDF obtidas para o posto de S.Julião do Tojal para os diferentes períodos de retorno e curvas antecedentes de Pereira et al. (2001) e Correia (2008).

Os resultados obtidos revelam que diferentes modelos conduzem as diferentes curvas IDF, o que revela à partida alguma ambiguidade no processo de estimação já que os pressupostos de cada método constam da bibliografia consultada. Ainda assim constata-se que em grande parte dos casos existem semelhanças significativas o que indica à partida que a metodologia proposta pode ser utilizada como critério de projeto, embora possa ainda carecer de melhorias para o seu uso mais seguro e eficiente no futuro.

5. Conclusões. Sugestões para prosseguimento do estudo.

A investigação realizada teve por objetivo desenvolver uma metodologia, solidamente sustentada do ponto de vista teórico, com vista a estimar, para qualquer posto udométrico de Portugal Continental que disponha de registos de precipitação horária, curvas IDF (ou linhas de possibilidade udométrica).

Com efeito, não obstante a relevância das precipitações intensas subdiárias na génese das cheias em Portugal Continental, os registos dessas precipitações são ainda relativamente escassos. Para extrair desses registos informação compatível com o seu tratamento estatístico, aplicaram-se séries de duração parcial às amostras de precipitações com diferentes durações subdiárias constituídas a partir dos registos de precipitações horárias

O desenvolvimento do estudo utilizou cerca de 289 296 registos de precipitações horárias obtidos por consulta do site do SNIRH em períodos de 10 a 12 anos hidrológicos, com início a 1 de Outubro de 2001.

Com base nas curvas IDF assim estabelecidas e na sua comparação com resultados equivalentes, apresentados em estudos antecedentes, foi possível tirar as seguintes conclusões:

- As menores diferenças entre as intensidades de precipitação estimadas pela metodologia proposta nesta dissertação e as de Correia (2008) ocorrem no posto de Abrantes para quaisquer períodos de retorno e durações consideradas. Nos postos de Monchique e S.Julião do Tojal para durações de precipitação superiores a 12h verifica-se na comparação com o mesmo estudo uma grande proximidade nos resultados, sendo que tal é também observado para todos os períodos de retorno, em ambos.
- As menores diferenças entre as intensidades de precipitação estimadas pela metodologia proposta nesta dissertação e as de Pereira, Rodrigues, & Costa (2001) observam-se no posto de Monchique para durações superiores 12h para qualquer período de retorno considerado. No posto de S.Julião do Tojal assinalam-se em semelhanças consideráveis para períodos de retorno até 100 anos e durações superiores a 6h enquanto para períodos de 500 e 1000 anos se verifica em durações superiores a 12h. Em ambos os postos as diferenças aumentam quase proporcionalmente ao aumento período de retorno.

De um modo geral, verifica-se que o método utilizado apresenta uma concordância satisfatória com os antecedentes sendo que as maiores discrepâncias se verificam na comparação com a metodologia de Pereira *et al.* (2001). Tal pode dever-se a fatores como a utilização de períodos de análise distintos, diferenças nos procedimentos de estimação que no caso desta dissertação tem subjacente o uso de séries de duração parcial e algumas simplificações consideradas no estabelecimento dos coeficientes *a* e *b* das curvas IDF no referido estudo.

As diferenças existentes entre as estimativas obtidas e as de Correia (2008) podem justificar-se por razões como o número de registos recolhidos, a seleção de limiares no presente estudo que é algo subjetiva para a maioria das durações estudadas e a própria metodologia de estimação distinta.

Posto isto, admite-se que o estudo desenvolvido represente um contributo relevante no domínio da análise de fenómenos extremos de precipitação, designadamente quando estão em causa amostras com reduzida dimensão, na medida em que permite o cálculo simples e preciso de precipitações máximas para durações inferiores ao dia, para qualquer período de retorno e bacia hidrográfica do território continental português.

As curvas IDF decorrentes da investigação realizada apresentam-se, assim, como alternativas às já existentes, pois o facto de terem utilizado mais amplamente a informação disponível, por meio das séries de duração parcial, faz esperar que caracterizem mais fidedignamente as precipitações intensas em Portugal Continental. Tal constatação não significa, contudo, que não se reconheça a necessidade de aprofundar e atualizar o estudo efetuado.

Como aspetos a retomar no seguimento do que foi desenvolvido nesta dissertação menciona-se:

- Alargar o número de postos objeto de estudo procedendo-se, simultaneamente, à atualização dos registos nos que foram agora analisados.
- Investigar o efeito da dimensão das amostras nas estimativas de precipitações intensas com diferentes durações fornecidas pela técnica das SDP com vista a concluir se existe ou não uma dimensão mínima a partir da qual tais estimativas convirjam, uma vez que se fixe o período de retorno.
- Testar outros critérios de identificação dos acontecimentos pluviosos independentes que constituem as SDP.
- Testar outras distribuições probabilísticas aplicáveis às SDP.
- No pressuposto da sua aplicação a amostras de precipitações subdiárias com dimensão compatível com a análise de SMA (i.e., superior a cerca de 15 anos), desenvolver um procedimento integrado que faculte estimativas de acordo com aquela metodologia, mas também decorrentes de SDP, num e noutro caso, eventualmente para mais de uma lei estatística. Competiria ao utilizador desse procedimento sopesar as diferentes estimativas que lhe fossem facultadas e optar por aquelas a considerar no prosseguimento da sua análise, tendo em conta por exemplo, o tipo de obra a que se aplicariam e os riscos a ela associados.

Por fim, é importante fazer referência à monitorização de variáveis hidrológicas. As SDP permitem utilizar de modo mais eficiente a informação contida em amostras pequenas. Contudo, os resultados a que conduzem refletem sempre a dimensão das amostras que lhes estão associadas, sendo tanto mais válidos, quanto mais longos forem os períodos de registo. Nesse sentido é fundamental continuar a monitorizar para dar mais consistência à modelação

hidrológica, no geral, mas também para permitir que o recurso a SDP se possa constituir como uma melhor alternativa de análise.

6. Bibliografia

- Balkema, A. A., & Haan, L. de. (1974). Residual Life Time at Great Age. *The Annals of Probability*, 2(5), 792–804.
- Correia, F. C. (2013). *Precipitações intensas. Caracterização com base em séries de duração parcial*. Instituto Superior Técnico.
- Correia, M. G. P. (2008). *Análise da precipitação máxima com média duração em Portugal Continental*. Instituto Superior Técnico.
- Correia, M. G. P., Portela, M. M., & Morais, J. M. P. da C. (2010). *Cálculo da precipitação máxima com média duração em Portugal Continental*.
- Cunnane, C. (1973). A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction. *Journal of Hydrology*, 18(3-4), 257–271.
- Cunnane, C. (1979). A note on the Poisson assumption in partial duration series models. *Water Resources Research*, 15(2), 489–494.
- Davison, A. C., & Smith, R. L. (1990). Models for exceedances over high thresholds. *J R Stat Soc Ser B. Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Methodological*, 52(3), 393–442.
- Fisher, R. A., & Tippett, L. H. C. (2008). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24(02), 180.
- Gilli, M., & Këllezi, E. (2006). An application of extreme value theory for measuring financial risk. *Computational Economics*, 27(2-3), 207–228.
- Gnedenko, B. (1943). Sur La Distribution Limite Du Terme Maximum D'Une Serie Aleatoire. *The Annals of Mathematics*, 44(3), 423.
- Godinho, S. (1989). *Valores Máximos Anuais da Quantidade de Precipitação. Estimativa dos valores relativos a durações inferiores a 24 horas (II)*. Lisboa: Nota Técnica de Meteorologia e Geofísica N°10, INMG.
- Jenkinson, A. F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81(348), 158–171.
- Katz, R. W. R., Parlange, M. M. B., & Naveau, P. (2002). Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25(8-12), 1287–1304.
- Kirby, W. (1969). On the Random Occurrence of Major Floods. *Water Resources Research*, 5(4), 778–784.

- Lang, M., Ouarda, T. B. M. J., & Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology*, 225(3-4), 103–117.
- Langbein, W. B. (1949). Annual floods and the partial-duration flood series. *Transactions, American Geophysical Union*, 30(6), 879.
- Lencastre, A. (1984). *Lições de hidrologia*. (FCT, Ed.). Universidade Nova de Lisboa.
- Maciel Vaz, C., Silva, M. M. P. C. dos S. R. da, & Nascimento Pinheiro, A. A. do. (2008). *Análise de tendências em séries de precipitação diária máxima anual Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil Júri*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Madsen, H., Rasmussen, P. F. P., & Rosbjerg, D. (1997). Comparison of annual maximum series and partial duration series methods for modeling extreme hydrologic events: 1. At-site modeling. *Water Resources Research*, 33(4), 747–757.
- MAOT. (2002). *Plano Nacional da Água, Volume 1*. Lisboa.
- Martins, C. M. C. (2010). *Alterações no padrão intra-anual de precipitação como indício de mudança climática*. UTL, Instituto Superior Técnico,.
- Martins, F. J. P. (2000). Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais. Departamento de Engenharia Civil.
- Matos, M. R. (1986). *Estudos de precipitação com aplicação no projecto de sistemas de drenagem pluvial . curvas intensidade - duração - frequência da precipitação em Portugal*. LNEC.
- Miquel, J., Chambolle, T., & Bernier, J. (1984). Guide pratique d'estimation des probabilités de crues, 160.
- Mises, R. Von. (1936). La distribution de la plus grande de n valeur, 1.
- Mkhandi, S., Opere, A., & Willems, P. (2005). Comparison between annual maximum and peaks over threshold models for flood frequency prediction. *Conference of UNESCO Flanders*, 15.
- Naghetini, M., & Pinto, É. J. D. A. (2007). *Hidrologia Estatística*. (CPRM, Ed.).
- Önöz, B., & Bayazit, M. (2001). Effect of the occurrence process of the peaks over threshold on the flood estimates. *Journal of Hydrology*, 244(1-2), 86–96.
- Pereira, C. C. L. B. (1995). *Análise de precipitações intensas*. Instituto Superior Técnico.
- Pereira, C. C. L. B., & Rodrigues, R. (1998). Precipitações Intensas em Portugal Continental para Períodos de Retorno até 1000 anos, 17.
- Pereira, C. C. L. B., Rodrigues, R., & Costa, J. (2001). Análise de fenómenos extremos. Precipitações intensas em Portugal Continental. *Lisboa, DSRH*, 64.

- Pickands, J. (1975). Statistical Inference Using Extreme Order Statistics. *The Annals of Statistics*, 3(1), 119–131.
- Portela, M. M. (2006). Estimação de precipitações intensas em bacias hidrográficas de Portugal Continental. *Associação Portuguesa Dos Recursos Hídricos (APRH)*, 27(1), 15–32.
- Prata, J. M. T. (2012). *Métodos de quantificação da chuva incidente em paredes*. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Rosário, P. A. G. (2013). *Análise de valores extremos para níveis pluviométricos em Barcelos*. Universidade de Lisboa.
- Rosbjerg, D., Madsen, H., & Rasmussen, P. F. (1992). Prediction in partial duration series with generalized pareto-distributed exceedances. *Water Resources Research*, 28(11), 3001–3010.
- Santos, F. ., & Miranda, P. (2006). *Alterações climáticas em Portugal cenários, impactos e medidas de adaptação. Projecto SIAM II*. (F. . Santos & P. Miranda, Eds.) (Gradiva). Lisboa: Gradiva.
- Shane, R. R. M., & Lynn, W. W. R. (1964). Mathematical model for flood risk evaluation. *Journal of the Hydraulics Division*, 90(6), 1–20.
- Silva, A. T., Portela, M. M., & Naghettini, M. (2012). Aplicação da técnica de séries de duração parcial à análise de frequência de variáveis hidrológicas aleatórias. *Associação Portuguesa Dos Recursos Hídricos (APRH)*, 11º Congresso Da Água, 1–15.
- Stedinger, J., Vogel, R., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency analysis of extreme events.
- Taesombut, V. (1978, December 18). Use of partial flood series for estimating distribution of maximum annual flood peak. *Hydrology Papers*, 79.
- Yevjevich, V. M. (1972). *Probability and statistics in hydrology* (Water Reso).
- Zelenhasic, E. F. (1970, December 18). Theoretical probability distributions for flood peaks. Colorado State University.

Anexo A

Estudos comparativos de análise para a estimação de curvas IDF:

- Resultados obtidos por de Brandão, et al., 2001 para 3 trechos temporais definidos (5 a 30min, 30min a 6h e 6h a 48h) com os respectivos parâmetros a e b e diferentes períodos de retorno.
- Resultados obtidos por *Correia et al. 2010* para durações diárias, com os repectivos parametros a , b e $c1$ e periodos de retorno padrão de 10 anos.

Códigos	Posto udográfico	Períodos de retorno (anos)															
		2		5		10		20		50		100		500		1000	
		Parâmetros ($I_{(m,h)}=aD_{(min)}^b$)															
IDF (válidas dos 5 aos 30 min)																	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
02G/09	Casal Soeiro	368.70	-0.697	487.77	-0.674	567.07	-0.665	643.30	-0.659	742.13	-0.652	816.26	-0.649	967.73	-0.643	1061.50	-0.641
03J/05	Vila da Ponte																
03Q/01	Bragança																
05T/01	Miranda do Douro	146.70	-0.539	179.44	-0.483	202.44	-0.461	224.96	-0.446	254.50	-0.431	276.82	-0.423	328.76	-0.409	351.19	-0.405
06K/07	Vila Real																
03M/01	Chaves	148.96	-0.585	217.29	-0.596	262.48	-0.600	305.82	-0.603	361.90	-0.605	403.91	-0.607	500.99	-0.609	542.72	-0.610
06V/01	Amarante																
06P/01	Cerejais																
08P/02	Escalhão																
03E/03	Viana do Castelo	202.49	-0.525	286.54	-0.512	342.32	-0.508	395.86	-0.504	465.21	-0.502	517.19	-0.500	637.36	-0.497	689.03	-0.496
07F/01	Porto (Serra do Pilar)																
10F/01	Aveiro (Universidade)	168.74	-0.529	213.70	-0.530	243.44	-0.531	271.90	-0.531	308.88	-0.531	336.53	-0.531	400.43	-0.532	427.90	-0.532
10J/01	Viseu																
10H/01	Caramulo	142.94	-0.457	179.08	-0.445	203.10	-0.439	226.18	-0.436	256.08	-0.431	278.50	-0.429	330.37	-0.425	352.67	-0.423
11V/01	Sta Comba Dão	178.77	-0.549	272.05	-0.575	333.98	-0.585	393.45	-0.592	470.50	-0.599	528.26	-0.602	661.80	-0.609	719.22	-0.611
11L/05	Penhas Douradas	163.11	-0.514	242.78	-0.518	295.51	-0.519	346.09	-0.520	411.56	-0.521	460.62	-0.522	573.97	-0.522	622.71	-0.523
12L/03	Covilhã	159.10	-0.527	215.00	-0.540	252.06	-0.546	287.63	-0.550	333.69	-0.554	368.22	-0.556	448.04	-0.561	482.36	-0.562
12C/01	Coimbra (IC)																
13L/02	Gralhas	219.65	-0.530	282.71	-0.514	324.65	-0.507	364.95	-0.503	417.19	-0.498	456.36	-0.495	546.97	-0.490	585.94	-0.489
21C/06	Lisboa (IGIDL)	176.46	-0.529	214.32	-0.499	239.69	-0.486	264.16	-0.477	295.96	-0.467	319.86	-0.461	375.21	-0.451	399.04	-0.447
21C/02	Lisboa (Portela)	187.70	-0.516	294.15	-0.555	365.58	-0.571	434.48	-0.581	524.03	-0.592	591.31	-0.598	747.18	-0.608	814.30	-0.611
20C/01	S. Julião do Tojal	164.68	-0.545	236.96	-0.557	284.64	-0.561	330.31	-0.565	389.37	-0.567	433.58	-0.569	535.70	-0.572	579.58	-0.573
22D/01	Setúbal																
16H/01	Barragem de Castelo de Bode																
18M/01	Portalegre	155.34	-0.498	189.67	-0.455	213.08	-0.437	235.80	-0.424	265.45	-0.411	287.78	-0.404	339.63	-0.392	361.99	-0.387
20E/01	Barragem de Magos																
20V/01	Pavia	155.93	-0.532	239.17	-0.563	294.68	-0.575	348.08	-0.584	417.36	-0.592	469.35	-0.597	589.64	-0.605	641.40	-0.607
22J/02	Évora-Cemitério	197.78	-0.534	228.45	-0.474	250.35	-0.449	271.98	-0.430	300.48	-0.412	322.13	-0.401	372.70	-0.383	394.60	-0.377
25J/02	Beja	163.46	-0.511	199.75	-0.478	224.26	-0.464	247.97	-0.454	278.84	-0.444	302.07	-0.438	355.92	-0.427	379.12	-0.424
23G/01	Pêgo do Altar																
26D/01	Sines	169.86	-0.536	233.04	-0.546	274.92	-0.550	315.12	-0.553	367.17	-0.556	406.19	-0.558	496.38	-0.561	535.16	-0.562
27G/01	Relíquias	162.92	-0.483	208.66	-0.432	240.08	-0.413	270.59	-0.399	310.41	-0.387	340.39	-0.380	409.97	-0.369	439.96	-0.365
30J/02	Catraia *																
31J/01	S. Brás de Alportel *																
30M/01	Figueirais *																
31F/01	Praia da Rocha	143.24	-0.516	209.85	-0.544	254.08	-0.555	296.56	-0.563	351.59	-0.571	392.85	-0.575	488.25	-0.582	529.28	-0.585
30F/01	Monchique	231.97	-0.549	274.93	-0.479	306.29	-0.452	337.36	-0.433	378.41	-0.415	409.57	-0.405	482.32	-0.387	513.81	-0.382
32D/01	Sagres																
31J/02	Faro	199.45	-0.541	246.18	-0.483	278.56	-0.461	310.14	-0.446	351.44	-0.431	382.59	-0.422	454.99	-0.408	486.23	-0.403
30M/02	Vila Real de Sto António	163.82	-0.479	204.99	-0.452	232.58	-0.440	259.17	-0.432	293.72	-0.424	319.66	-0.419	379.75	-0.410	405.61	-0.408

* Digitalização não sistemática (DNS)

Figura A6 -Parâmetros das curvas IDF, para duração entre 5 e 30 minutos (retirado de Brandão, et al., 2001).

Posto pluviométrico	Períodos de retorno (anos)															
	2		5		10		20		50		100		500		1000	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Casal Soeiro	208.29	-0.533	347.51	-0.581	445.15	-0.602	541.43	-0.617	668.76	-0.632	765.64	-0.640	992.65	-0.656	1091.60	-0.660
Vila da Ponte																
Bragança																
Miranda do Douro	243.20	-0.699	467.22	-0.766	630.14	-0.793	793.34	-0.812	1011.70	-0.830	1179.10	-0.841	1574.50	-0.859	1747.10	-0.865
Vila Real																
Chaves	211.55	-0.691	390.39	-0.753	520.77	-0.779	651.83	-0.798	827.78	-0.817	963.14	-0.828	1284.00	-0.847	1424.60	-0.853
Amarante																
Cerejais																
Escalhão																
Viana do Castelo	281.33	-0.624	545.43	-0.704	742.80	-0.738	943.80	-0.762	1216.60	-0.786	1428.20	-0.800	1934.00	-0.824	2156.80	-0.832
Porto (Serra do Pilar)																
Aveiro (Universidade)	253.70	-0.654	361.63	-0.693	435.95	-0.697	508.78	-0.707	604.76	-0.718	677.67	-0.725	848.55	-0.738	922.80	-0.742
Viseu																
Caramulo	118.17	-0.416	186.42	-0.466	235.34	-0.489	284.34	-0.507	350.11	-0.526	400.79	-0.537	521.30	-0.558	574.26	-0.565
Sta Comba Dão	241.72	-0.641	378.45	-0.663	470.50	-0.672	569.43	-0.678	675.14	-0.684	762.16	-0.687	963.91	-0.693	1050.80	-0.695
Penhas Douradas	148.88	-0.499	297.38	-0.579	409.76	-0.613	524.90	-0.638	681.88	-0.662	804.03	-0.676	1097.00	-0.700	1226.30	-0.709
Covilhã	138.14	-0.493	194.75	-0.521	233.27	-0.535	270.74	-0.545	319.82	-0.555	366.92	-0.562	443.41	-0.573	480.84	-0.577
Coimbra (IG)	280.69	-0.653	374.38	-0.647	436.65	-0.644	496.49	-0.643	574.03	-0.641	632.17	-0.640	766.63	-0.639	824.45	-0.638
Gralhas	229.22	-0.561	361.34	-0.604	453.73	-0.623	544.85	-0.637	665.47	-0.651	757.34	-0.660	973.15	-0.675	1067.00	-0.680
Lisboa (IGIDL)	251.82	-0.628	345.32	-0.634	407.36	-0.637	466.92	-0.639	544.07	-0.641	601.92	-0.642	735.65	-0.644	793.16	-0.645
Lisboa (Portela)	359.15	-0.711	417.04	-0.665	461.54	-0.647	506.26	-0.634	565.82	-0.623	611.24	-0.616	717.68	-0.605	763.86	-0.602
S. Julião do Tojal	205.93	-0.596	238.70	-0.544	265.17	-0.525	292.01	-0.512	327.90	-0.500	365.32	-0.493	419.64	-0.482	447.56	-0.479
Setúbal																
Barragem de Castelo de Bode																
Portalegre	229.15	-0.622	369.81	-0.674	504.10	-0.697	617.67	-0.713	768.83	-0.729	884.39	-0.739	1156.70	-0.756	1275.50	-0.761
Barragem de Magos																
Pavia	237.28	-0.659	306.77	-0.647	353.20	-0.642	397.89	-0.639	455.90	-0.635	499.43	-0.633	600.18	-0.630	643.53	-0.629
Évora-Cemitério	366.51	-0.713	571.47	-0.735	709.63	-0.744	843.21	-0.751	1017.00	-0.757	1147.90	-0.761	1451.30	-0.767	1582.10	-0.769
Beja	303.85	-0.692	468.63	-0.727	581.81	-0.743	692.32	-0.754	837.37	-0.765	947.16	-0.772	1203.30	-0.783	1314.20	-0.787
Pêgo do Altar																
Sines	316.67	-0.719	416.93	-0.713	483.30	-0.711	546.97	-0.709	629.39	-0.707	691.15	-0.706	833.87	-0.705	895.23	-0.704
Relíquias	285.02	-0.658	484.95	-0.693	619.29	-0.691	748.90	-0.697	917.30	-0.702	1043.80	-0.705	1336.80	-0.710	1462.90	-0.712
Catraia *					358.73	-0.583			600.18	-0.595	745.31	-0.600	1225.90	-0.611	1519.50	-0.616
S. Brás de Alportel *					342.70	-0.575			589.56	-0.576	709.50	-0.577	1174.90	-0.580	1459.40	-0.581
Figueirais *					373.03	-0.579			748.70	-0.592	1006.60	-0.598	1980.80	-0.610	3323.50	-0.656
Praia da Rocha	254.91	-0.684	366.91	-0.700	441.75	-0.706	513.84	-0.711	607.46	-0.715	677.76	-0.718	840.56	-0.723	910.65	-0.724
Monchique	245.74	-0.566	312.01	-0.509	361.22	-0.491	409.85	-0.479	473.87	-0.469	522.31	-0.463	635.09	-0.454	683.80	-0.451
Sagres																
Faro	312.50	-0.679	475.42	-0.696	593.37	-0.688	686.94	-0.690	821.02	-0.691	921.51	-0.692	1153.80	-0.693	1253.60	-0.694
Vila Real de Sto António	342.68	-0.690	483.64	-0.694	577.01	-0.696	666.52	-0.697	782.29	-0.698	869.17	-0.699	1069.70	-0.700	1155.90	-0.700

* Digitalização não sistemática (DNS)

Figura A7 - Parâmetros das curvas IDF, para duração entre 30 minutos e 6 horas (retirado de Brandão, et al., 2001).

Códigos	Posto hidrográfico	Períodos de retorno (anos)															
		2		5		10		20		50		100		500		1000	
		Parâmetros ($y_{max} = aD_{max}^b$)								IDF (válidas dos 6 às 48 h)							
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
02G/09	Casal Soeiro	292.29	-0.589	267.00	-0.545	293.03	-0.527	302.25	-0.513	317.15	-0.499	329.73	-0.491	361.60	-0.477	376.10	-0.472
03J05	Vila da Ponte																
03Q/01	Bragança																
05T/01	Miranda do Douro	255.40	-0.701	269.27	-0.669	283.58	-0.656	299.23	-0.646	321.19	-0.636	338.48	-0.630	380.08	-0.620	398.44	-0.617
06K/07	Vila Real																
03M01	Chaves	171.15	-0.654	189.58	-0.635	203.14	-0.627	216.72	-0.621	234.84	-0.614	248.70	-0.610	281.34	-0.603	295.54	-0.601
06V/01	Amarante																
06P/01	Cerejeiras																
08P/02	Escalhão																
03E/03	Viana do Castelo	325.76	-0.652	317.36	-0.616	320.05	-0.599	325.96	-0.596	336.65	-0.574	346.17	-0.566	371.29	-0.552	383.00	-0.547
07F/01	Porto (Serra do Pilar)																
10F/01	Aveiro (Universidade)	278.52	-0.669	360.93	-0.677	415.45	-0.681	467.72	-0.684	535.37	-0.687	586.04	-0.689	703.13	-0.693	753.46	-0.694
10J/01	Viseu																
10H/01	Caramulo	208.61	-0.504	235.18	-0.496	253.03	-0.492	270.27	-0.488	292.72	-0.485	309.62	-0.482	348.84	-0.478	365.76	-0.477
11V/01	Sta Comba Dão	239.96	-0.639	347.38	-0.651	419.30	-0.656	488.63	-0.660	578.72	-0.663	646.41	-0.666	803.21	-0.669	870.74	-0.671
11L/05	Penhas Douradas	223.11	-0.559	246.16	-0.542	262.85	-0.534	279.48	-0.528	301.63	-0.522	318.54	-0.518	358.34	-0.511	375.66	-0.508
12L/03	Covilhã	153.40	-0.505	168.42	-0.488	179.26	-0.480	190.07	-0.473	204.45	-0.467	215.44	-0.463	241.30	-0.455	252.57	-0.453
12G/01	Coimbra (IG)	271.67	-0.653	485.15	-0.685	639.05	-0.712	792.84	-0.725	988.29	-0.738	1155.70	-0.745	1527.60	-0.758	1689.90	-0.762
13L/02	Gralhas	201.11	-0.5287	213.87	-0.5023	224.77	-0.4901	236.26	-0.4809	252.11	-0.4715	264.47	-0.4658	294.1	-0.4556	307.14	-0.4521
21C/06	Lisboa (IGIDL)	362.78	-0.698	545.58	-0.721	670.81	-0.732	792.97	-0.739	953.23	-0.747	1074.50	-0.752	1367.30	-0.760	1479.80	-0.762
21C/02	Lisboa (Portela)	474.64	-0.756	763.29	-0.764	955.11	-0.767	1139.40	-0.769	1378.10	-0.771	1557.10	-0.772	1970.90	-0.773	2148.80	-0.774
20C/01	S. Julião do Tojal	381.00	-0.705	612.46	-0.753	1122.70	-0.770	1430.30	-0.781	1837.90	-0.792	2147.20	-0.797	2872.40	-0.807	3186.90	-0.810
22D/01	Setúbal																
16H/01	Barragem de Castelo de Bode																
18M/01	Portalegre	252.46	-0.639	267.90	-0.624	312.55	-0.617	336.72	-0.612	368.50	-0.606	392.58	-0.603	448.78	-0.597	473.11	-0.596
20E/01	Barragem de Magos																
20M/01	Pavia	262.93	-0.680	395.64	-0.689	483.85	-0.692	568.61	-0.695	678.44	-0.697	760.81	-0.698	951.27	-0.700	1033.20	-0.701
22J/02	Évora-Cemitério	354.04	-0.712	632.50	-0.732	854.02	-0.741	772.17	-0.747	926.70	-0.753	1043.40	-0.757	1314.90	-0.764	1432.20	-0.766
25J/02	Beja	368.82	-0.725	511.80	-0.742	608.92	-0.750	703.36	-0.756	826.97	-0.762	920.38	-0.766	1138.10	-0.773	1232.00	-0.776
23G/01	Pêgo do Altar																
26D/01	Sines	293.59	-0.709	455.06	-0.733	566.36	-0.744	675.25	-0.752	818.37	-0.759	926.80	-0.764	1180.00	-0.772	1289.80	-0.775
27G/01	Relíquias	489.17	-0.750	639.99	-0.778	1082.00	-0.790	1318.40	-0.797	1628.20	-0.805	1862.50	-0.809	2408.20	-0.816	2644.10	-0.819
30J/02	Castroia *					359.74	-0.583			609.66	-0.597	745.65	-0.600	1227.00	-0.611	1520.90	-0.616
31J/01	S. Brás de Alportel *					509.07	-0.634			923.58	-0.648	1219.40	-0.658	2210.20	-0.675	2858.60	-0.682
30M/01	Figueirais *					756.40	-0.685			1666.50	-0.712	2324.80	-0.724	5081.90	-0.752	6999.60	-0.761
31F/01	Praia da Rocha	420.21	-0.773	481.99	-0.749	527.23	-0.739	572.27	-0.732	632.04	-0.725	677.55	-0.721	784.16	-0.714	830.42	-0.711
30F/01	Monchique	593.83	-0.710	1687.20	-0.785	2342.80	-0.810	3107.90	-0.825	4135.30	-0.840	4923.70	-0.848	6783.50	-0.860	7594.20	-0.864
32D/01	Sagres																
31J/02	Faro	405.67	-0.726	594.84	-0.724	720.14	-0.724	840.34	-0.723	995.95	-0.723	1112.60	-0.723	1382.10	-0.722	1497.90	-0.722
30M/02	Vila Real de Sto António	432.64	-0.735	535.23	-0.718	605.53	-0.711	674.11	-0.706	763.99	-0.701	831.45	-0.699	989.58	-0.694	1056.30	-0.693

* Digitalização não sistemática (DNS)

Figura A8 - Parâmetros das curvas IDF, para duração entre 6 e 48 horas (retirado de Brandão, et al., 2001).



Coeficiente a da linha de
possibilidade udométrica para o
período de retorno de 10 anos



Expoente b da linha de
possibilidade udométrica para o
período de retorno de 10 anos



Coeficiente c_1

Figura A9 - Parâmetros das linhas de possibilidade udométrica para precipitações expressas em milímetros e durações em dias (retirado de Correia et al. 2010).

Anexo B

Resultados decorrentes da estimação de quantis de probabilidade das SDP, com períodos de retorno relativos a máximos anuais, para os três postos udométricos em análise

Tabela B4 - Quantis de probabilidade, x , para diferentes períodos de retorno estimados com base nas SDP no posto de Abrantes.

	T (anos)	F(x)	Equação H	H(x)	Estimativa x
1h	5	0.800	0.000	0.980	17.209
	10	0.900	0.000	0.991	19.927
	100	0.990	0.000	0.999	28.436
	500	0.998	0.000	1.000	34.278
	1000	0.999	0.000	1.000	36.790
2h	5	0.800	0.000	0.970	23.879
	10	0.900	0.000	0.986	27.697
	100	0.990	0.000	0.999	39.653
	500	0.998	0.000	1.000	47.862
	1000	0.999	0.000	1.000	51.392
4h	5	0.800	0.000	0.974	30.149
	10	0.900	0.000	0.988	34.907
	100	0.990	0.000	0.999	49.807
	500	0.998	0.000	1.000	60.037
	1000	0.999	0.000	1.000	64.435
6h	5	0.800	0.000	0.969	34.938
	10	0.900	0.000	0.986	40.520
	100	0.990	0.000	0.999	57.998
	500	0.998	0.000	1.000	70.000
	1000	0.999	0.000	1.000	75.159
8h	5	0.800	0.000	0.976	37.857
	10	0.900	0.000	0.989	43.832
	100	0.990	0.000	0.999	62.538
	500	0.998	0.000	1.000	75.383
	1000	0.999	0.000	1.000	80.906
10h	5	0.800	0.000	0.977	40.675
	10	0.900	0.000	0.989	47.160
	100	0.990	0.000	0.999	67.464
	500	0.998	0.000	1.000	81.405
	1000	0.999	0.000	1.000	87.399
12h	5	0.800	0.000	0.976	42.237
	10	0.900	0.000	0.989	48.906
	100	0.990	0.000	0.999	69.789
	500	0.998	0.000	1.000	84.128
	1000	0.999	0.000	1.000	90.293
18h	5	0.800	0.000	0.979	49.857
	10	0.900	0.000	0.990	58.014
	100	0.990	0.000	0.999	83.558
	500	0.998	0.000	1.000	101.097
	1000	0.999	0.000	1.000	108.637
24h	5	0.800	0.000	0.978	54.457
	10	0.900	0.000	0.989	63.430
	100	0.990	0.000	0.999	91.526
	500	0.998	0.000	1.000	110.818
	1000	0.999	0.000	1.000	119.112

Tabela B5 - Quantis de probabilidade, x , para diferentes períodos de retorno estimados com base nas SDP no posto de Monchique.

	T (anos)	F(x)	Equação H	H(x)	Estimativa x
1h	5	0.800	0.000	0.987	26.820
	10	0.900	0.000	0.994	30.969
	100	0.990	0.000	0.999	43.963
	500	0.998	0.000	1.000	52.884
	1000	0.999	0.000	1.000	56.720
2h	5	0.800	0.000	0.977	38.595
	10	0.900	0.000	0.989	44.489
	100	0.990	0.000	0.999	62.945
	500	0.998	0.000	1.000	75.617
	1000	0.999	0.000	1.000	81.065
4h	5	0.800	0.000	0.979	57.558
	10	0.900	0.000	0.990	66.650
	100	0.990	0.000	0.999	95.120
	500	0.998	0.000	1.000	114.668
	1000	0.999	0.000	1.000	123.073
6h	5	0.800	0.000	0.986	67.273
	10	0.900	0.000	0.993	77.848
	100	0.990	0.000	0.999	110.962
	500	0.998	0.000	1.000	133.699
	1000	0.999	0.000	1.000	143.474
8h	5	0.800	0.000	0.985	74.485
	10	0.900	0.000	0.993	86.212
	100	0.990	0.000	0.999	122.933
	500	0.998	0.000	1.000	148.146
	1000	0.999	0.000	1.000	158.986
10h	5	0.800	0.000	0.985	80.777
	10	0.900	0.000	0.993	93.596
	100	0.990	0.000	0.999	133.737
	500	0.998	0.000	1.000	161.299
	1000	0.999	0.000	1.000	173.149
12h	5	0.800	0.000	0.982	86.007
	10	0.900	0.000	0.991	99.734
	100	0.990	0.000	0.999	142.717
	500	0.998	0.000	1.000	172.231
	1000	0.999	0.000	1.000	184.919
18h	5	0.800	0.000	0.978	98.432
	10	0.900	0.000	0.990	114.205
	100	0.990	0.000	0.999	163.597
	500	0.998	0.000	1.000	197.511
	1000	0.999	0.000	1.000	212.091
24h	5	0.800	0.000	0.981	110.178
	10	0.900	0.000	0.991	128.293
	100	0.990	0.000	0.999	185.017
	500	0.998	0.000	1.000	223.966
	1000	0.999	0.000	1.000	240.711

Tabela B6 - Quantis de probabilidade, x , para diferentes períodos de retorno estimados com base nas SDP no posto de S.Julião do Tojal.

	T (anos)	F(x)	Equação H	H(x)	Estimativa x
1h	5	0.800	0.000	0.958	47.591
	10	0.900	0.000	0.980	58.158
	100	0.990	0.000	0.998	91.244
	500	0.998	0.000	1.000	113.962
	1000	0.999	0.000	1.000	123.729
2h	5	0.800	0.000	0.972	53.518
	10	0.900	0.000	0.987	63.947
	100	0.990	0.000	0.999	96.606
	500	0.998	0.000	1.000	119.031
	1000	0.999	0.000	1.000	128.672
4h	5	0.800	0.000	0.978	59.650
	10	0.900	0.000	0.990	70.353
	100	0.990	0.000	0.999	103.866
	500	0.998	0.000	1.000	126.877
	1000	0.999	0.000	1.000	136.770
6h	5	0.800	0.000	0.981	57.380
	10	0.900	0.000	0.991	66.924
	100	0.990	0.000	0.999	96.808
	500	0.998	0.000	1.000	117.327
	1000	0.999	0.000	1.000	126.149
8h	5	0.800	0.000	0.983	52.088
	10	0.900	0.000	0.992	59.859
	100	0.990	0.000	0.999	84.193
	500	0.998	0.000	1.000	100.902
	1000	0.999	0.000	1.000	108.085
10h	5	0.800	0.000	0.984	52.869
	10	0.900	0.000	0.993	60.435
	100	0.990	0.000	0.999	84.129
	500	0.998	0.000	1.000	100.398
	1000	0.999	0.000	1.000	107.393
12h	5	0.800	0.000	0.985	59.137
	10	0.900	0.000	0.993	68.067
	100	0.990	0.000	0.999	96.030
	500	0.998	0.000	1.000	115.230
	1000	0.999	0.000	1.000	123.485
18h	5	0.800	0.000	0.986	54.372
	10	0.900	0.000	0.994	61.598
	100	0.990	0.000	0.999	84.225
	500	0.998	0.000	1.000	99.761
	1000	0.999	0.000	1.000	106.441
24h	5	0.800	0.000	0.987	55.086
	10	0.900	0.000	0.994	61.972
	100	0.990	0.000	0.999	83.531
	500	0.998	0.000	1.000	98.334
	1000	0.999	0.000	1.000	104.699

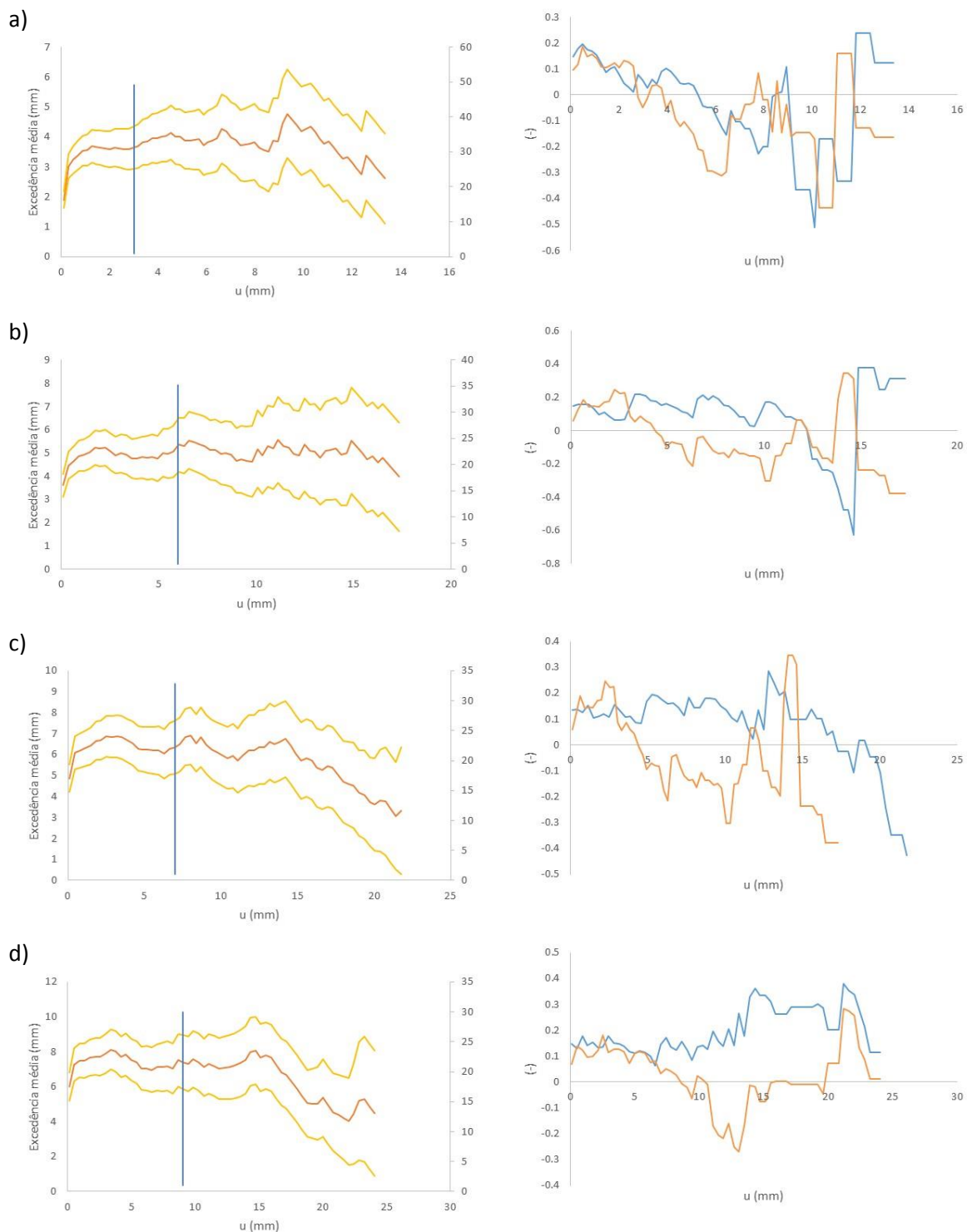
Anexo C

Para os três postos udométricos em estudo e respectivas durações consideradas :

- Escolha dos limiares apropriados em função do limiares obtidos e excedências médias
- Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar, para os três postos udométricos em estudo.

Abrantes

Tabela C7 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Abrantes, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): a) 1h, b) 2h, c) 4h, d) 6h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.



Legenda:

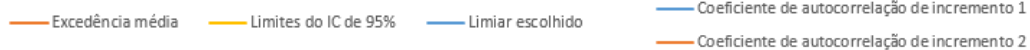
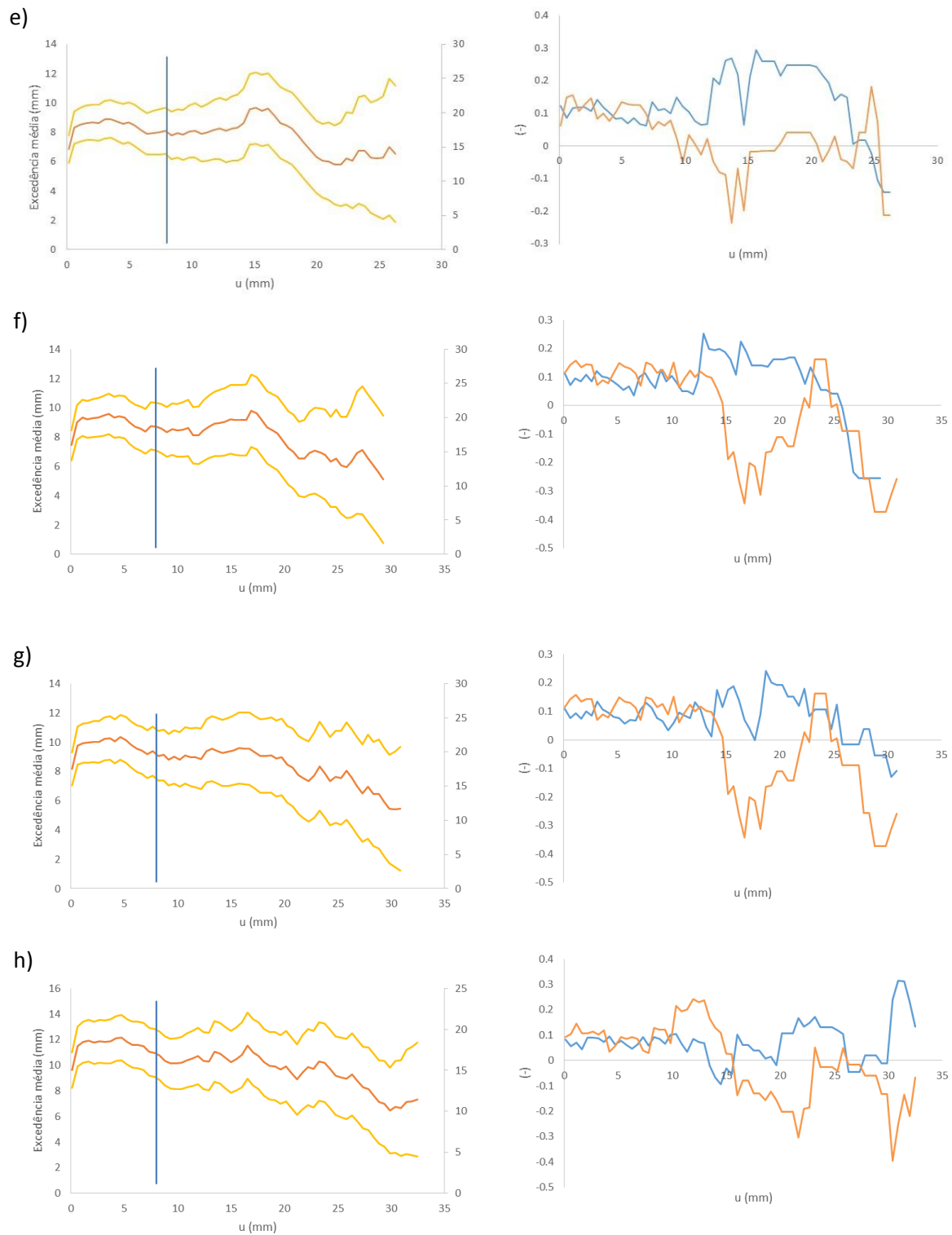


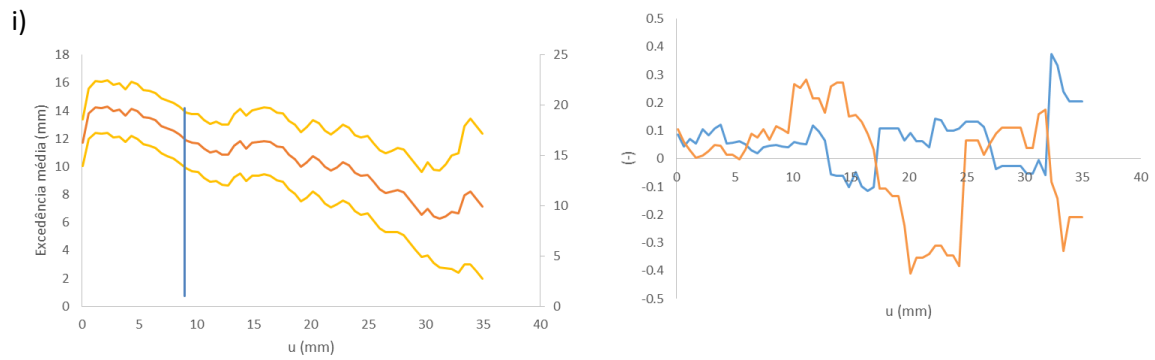
Tabela C8 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Abrantes, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): e) 8h, f) 10h, g) 12h, h) 18h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.



Legenda:



Tabela C9 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Abrantes (à esquerda) para a duração de 24h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar na figura.

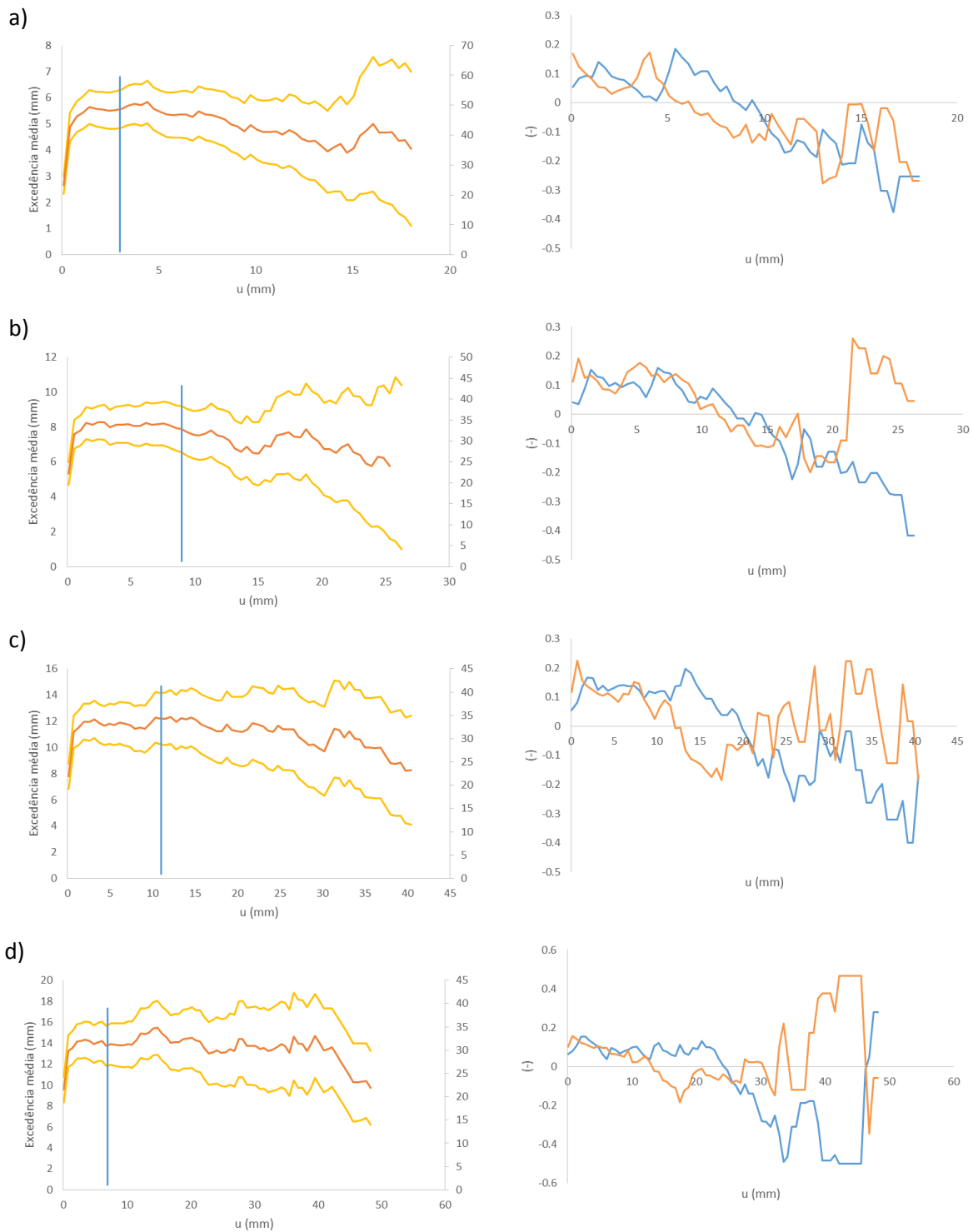


Legenda:

- Excedência média
- Limites do IC de 95%
- Limiar escolhido
- Coeficiente de autocorrelação de incremento 1
- Coeficiente de autocorrelação de incremento 2

Monchique

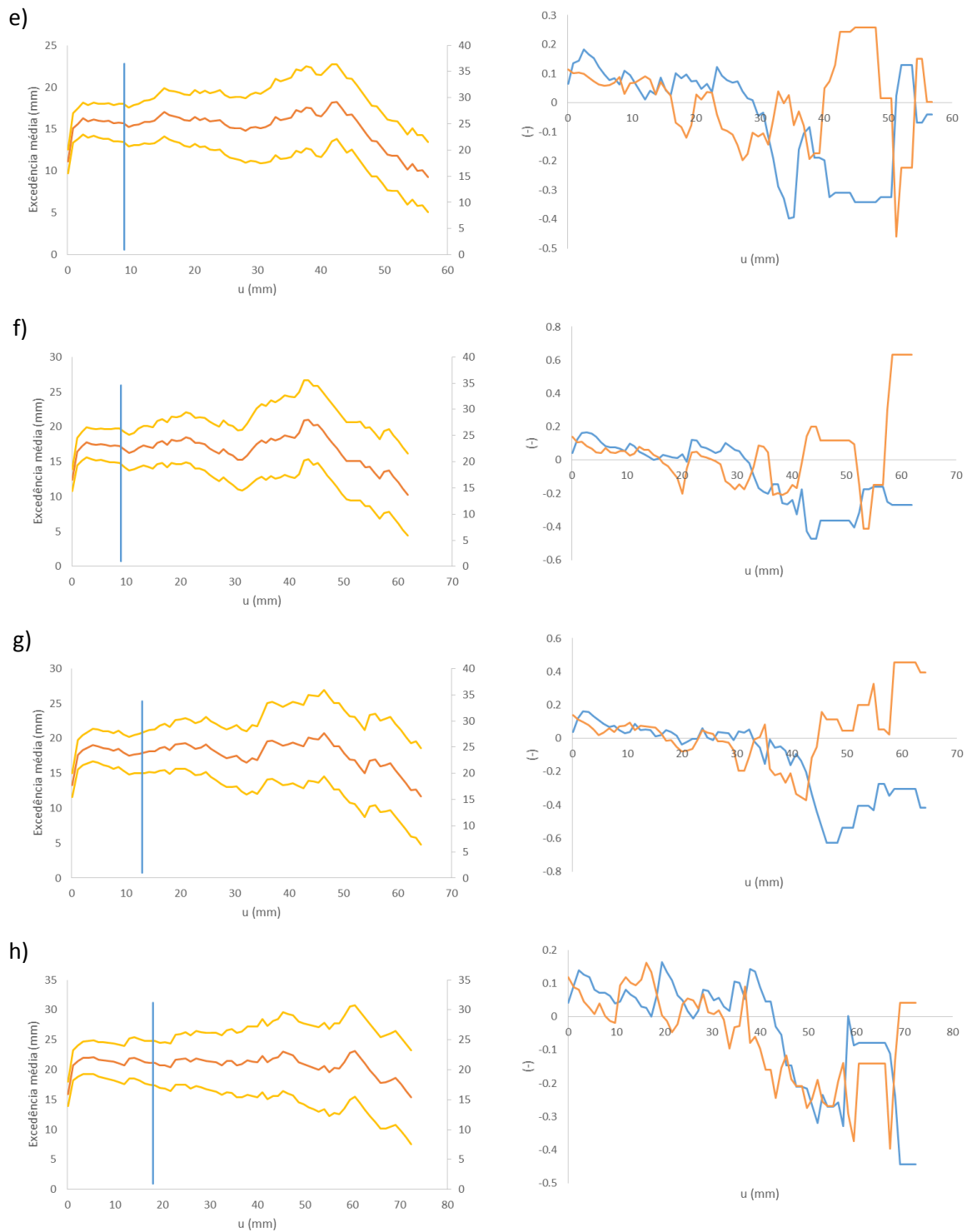
Tabela C10 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Monchique, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): a) 1h, b) 2h, c) 4h, d) 6h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.



Legenda:

- Excedência média
- Limites do IC de 95%
- Limiar escolhido
- Coeficiente de autocorrelação de incremento 1
- Coeficiente de autocorrelação de incremento 2

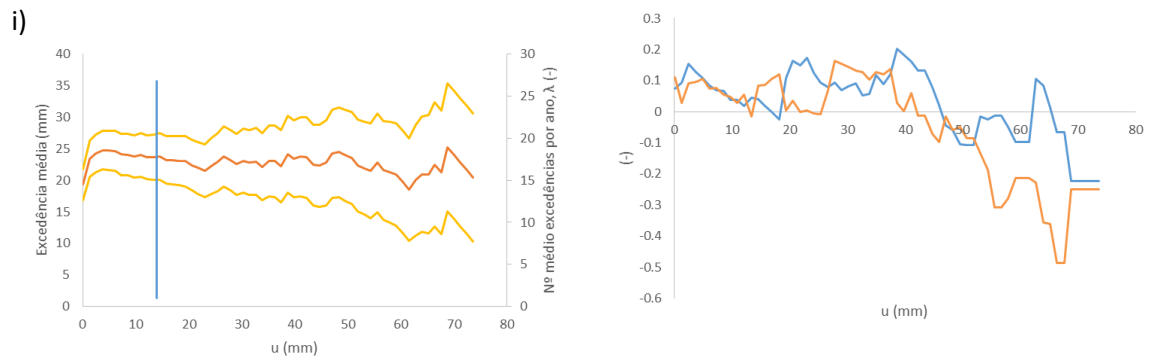
Tabela C11 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Monchique, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): e) 8h, f) 10h, g) 12h, h) 18h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.



Legenda:



Tabela C12 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de Monchique (à esquerda) para a duração de 24h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar na figura.

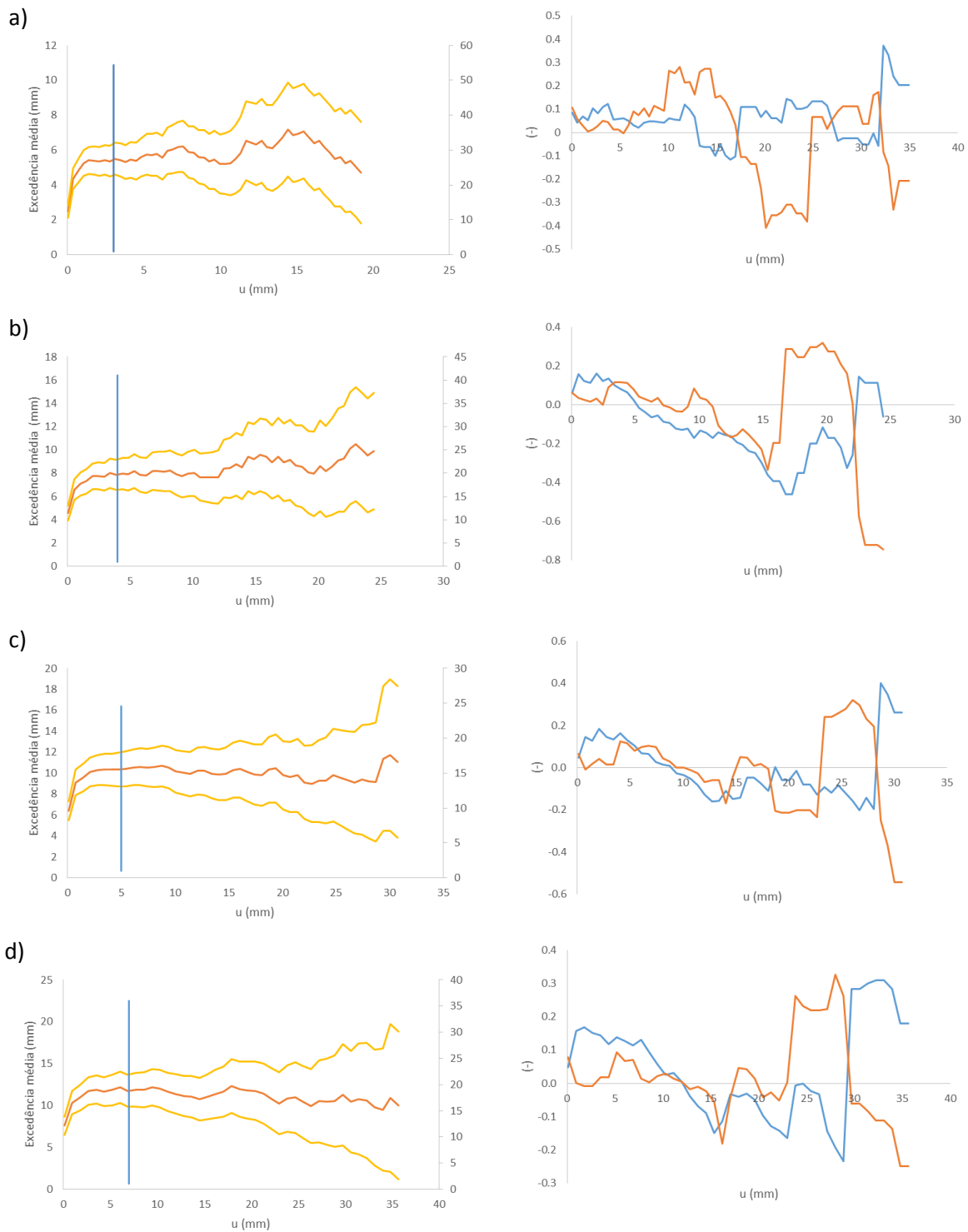


Legenda:

- Excedência média
- Limites do IC de 95%
- Limiar escolhido
- Coeficiente de autocorrelação de incremento 1
- Coeficiente de autocorrelação de incremento 2

S.Julião do Tojal

Tabela C13 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de S.Julião do Tojal, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): a) 1h, b) 2h, c) 4h, d) 6h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.



Legenda:

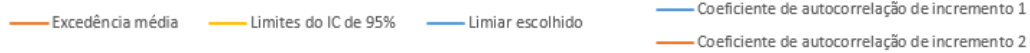
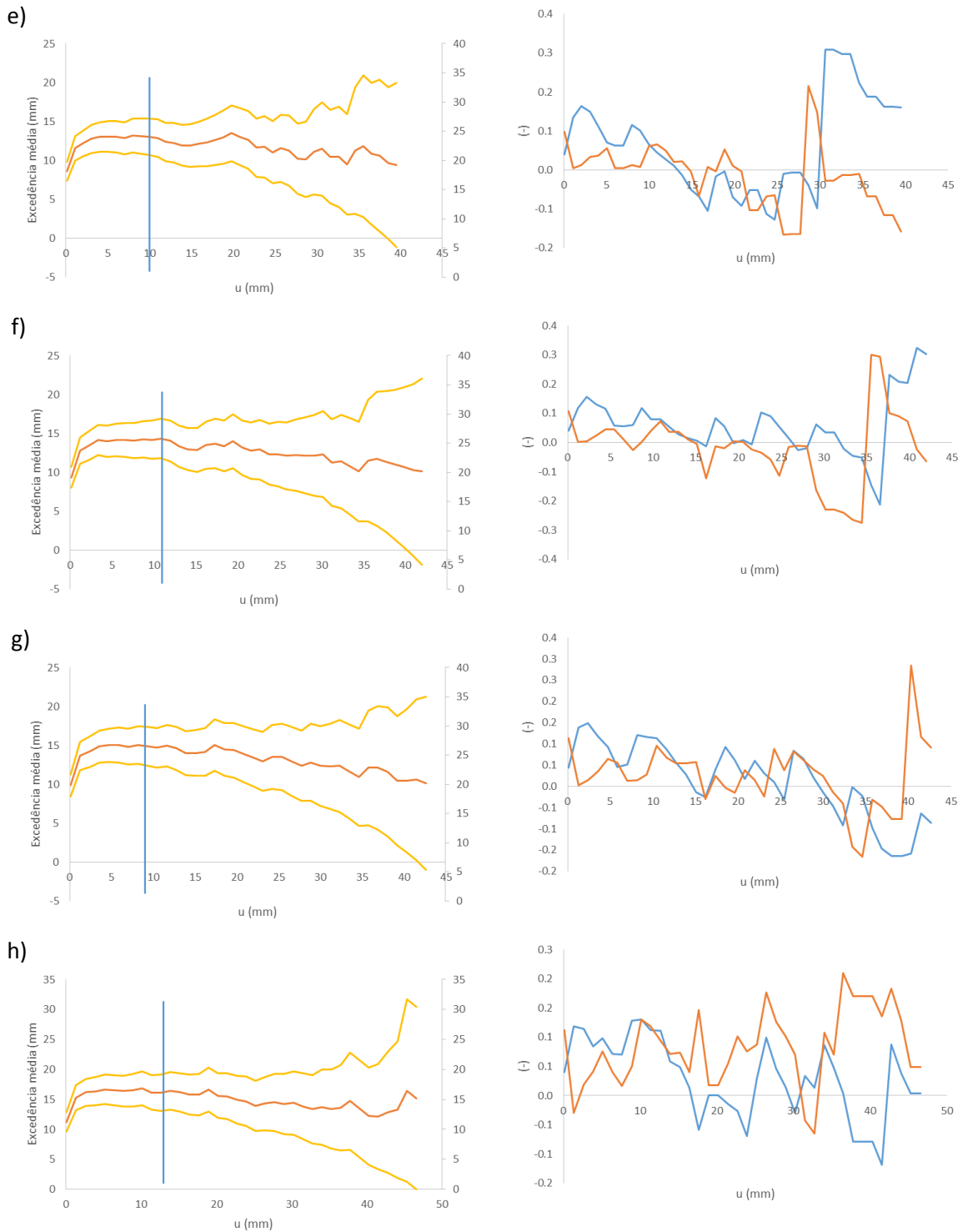


Tabela C14 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de S.Julião do Tojal, e diferentes durações de precipitação (à esquerda): e) 8h, f) 10h, g) 12h, h) 18h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar nas figuras.



Legenda:

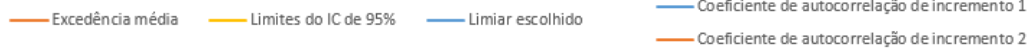
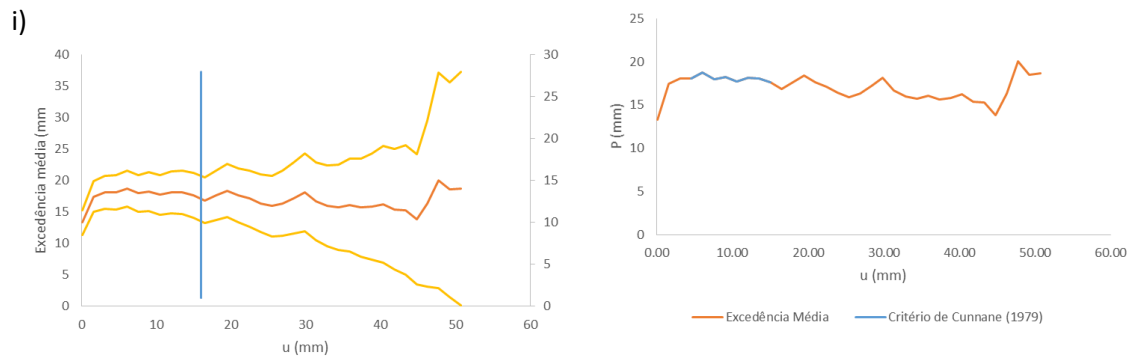


Tabela C9 - Escolha de limiares em função do limiar e excedência média para o posto de S.Julião do Tojal (à esquerda) para a duração de 24h . Coeficientes de autocorrelação de incremento 1 e 2 para as diferentes durações consideradas em função do limiar (à direita). Nota : o eixo vertical do lado direito refere-se ao número medido de excedências que se optou por não representar na figura.



Legenda:

- Excedência média
- Limites do IC de 95%
- Limiar escolhido
- Coeficiente de autocorrelação de incremento 1
- Coeficiente de autocorrelação de incremento 2