

Variação da actividade sísmica ao longo do ano na Península Ibérica

Maria Cecília Marques Rodrigues †

† Departamento de Matemática da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa
mmr@fct.unl.pt

Abstract

The objective is to research on the existence of a significant variation in the number of earthquakes in the Iberian Peninsula throughout the year.

A simulation model for the process of seismic activity in the Iberian Peninsula was used to create a sample of seismic occurrences that would allow to research the existence of a significant variation in the number of earthquakes throughout the year.

Once this variation was detected the periods with greater number of seismic occurrences were identified based on a seismic catalogue.

The existence of a significant variation in the number of seismic occurrences throughout the year was verified. This variation lessened as the seismic magnitude increased. Therefore, February, March, April and June were months in which the highest number of light earthquakes were registered. Earthquakes registering a moderate magnitude occurred mostly in February and October. No significant variation of seismic occurrences was detected throughout the year for earthquakes registering a strong magnitude.

Resumo

Pretende-se averiguar a existência de variação significativa do número de sismos ocorridos na Península Ibérica ao longo do ano. Estudos anteriores apontavam para a existência desta variação, indicando ser mais provável a ocorrência de sismos em certas épocas do ano, não se tendo feito contudo uma análise quantitativa.

Utilizou-se um modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica para gerar uma amostra de ocorrências sísmicas que permitisse averiguar a existência de variação significativa do número de sismos ao longo do ano.

Uma vez detectada esta variação, a identificação das épocas com maior número de ocorrências foi efectuada com base num catálogo sísmico.

Estudaram-se separadamente sismos de qualquer magnitude, sismos de fraca, média e forte magnitude.

Constatou-se a existência de variação significativa do número de ocorrências sísmicas ao longo do ano, atenuando-se esta variação à medida que a magnitude dos

sismos aumenta. Deste modo, para sismos de fraca magnitude, a época do ano em que ocorre maior número de sismos corresponde aos meses de Fevereiro, Março Abril e Junho. Para sismos de média magnitude o maior número de ocorrências sísmicas verifica-se nos meses de Fevereiro e Outubro. Para sismos de forte magnitude não se detectou variação significativa de ocorrências sísmicas ao longo do ano.

Palavras Chave: Simulação; Simulação sísmica; Estatística; Aplicações da Investigação Operacional;

Title: The variation in seismic activity throughout the year in the Iberian Peninsula

1 Introdução

O fenómeno sísmico sempre preocupou o homem quer pelo seu caracter destrutivo quer pela sua imprevisibilidade.

Muitos estudos já feitos conseguiram identificar alguns precursores sísmicos, não se conseguindo contudo ainda prever, com janelas temporais pequenas, a ocorrência de abalos sísmicos.

O objectivo deste trabalho consiste em avaliar se existe variação significativa da sismicidade ao longo do ano, isto é, se nalgumas épocas é mais provável a ocorrência de sismos do que noutras e, no caso de se confirmar tal variação, identificar quais as épocas com maior risco de abalos sísmicos.

Há já algum tempo que se suspeitava que, pelo menos nalgumas regiões, a sismicidade não era constante ao longo do ano.

Com efeito, Nunes (Nunes et al., 2001) refere que, nos Açores, em particular no *Rifte* da Terceira (Graciosa, Terceira, S. Miguel e zonas marítimas associadas) os sismos destrutivos ocorrem sobretudo nos meses de Janeiro e Junho. Já anteriormente, Machado (Machado, 1955) tinha constatado que os abalos sísmicos são mais prováveis na vizinhança dos solstícios, ou seja, de Novembro a Janeiro e de Maio a Julho.

Se efectivamente se provar que, em certas épocas do ano, ocorrem mais sismos, poder-se-á considerar que futuramente é mais provável a ocorrência de sismos nalgumas épocas do ano.

A Investigação Operacional, dada a sua natureza interdisciplinar e sistémica, constitui um precioso contributo para a averiguação da existência da referida variação.

Neste trabalho estudou-se a Península Ibérica, bem como a zona adjacente do Oceano Atlântico, isto é, a região delimitada por Longitude 15° W - 4° E , Latitude 34,5° N - 44° N.

Estudaram-se separadamente sismos de qualquer magnitude, fraca, média e forte magnitude.

2 Modelo de simulação utilizado para a geração do processo sísmico

Para a simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica foi utilizado o modelo proposto por Costa (Costa, 1989), posteriormente calibrado com dados mais recentes.

No modelo adoptado, cada ocorrência é caracterizada por três factores: *Tempo*, *Grandeza* e *Espaço*.

- O factor Tempo é caracterizado pelos valores dos intervalos de tempo entre sismos consecutivos - Dt .

Para a geração do intervalo de tempo até à próxima ocorrência, Dt_i , são utilizados os dois intervalos de tempo precedentes (Dt_{i-2} , Dt_{i-1}), i. e.,

$$(Dt_{i-2}, Dt_{i-1}) \rightarrow Dt_i$$

- A Grandeza - G é caracterizada pelos valores de magnitude Richter associados às ocorrências.

Para gerar a Grandeza da próxima ocorrência, G_i , são utilizados os valores das grandezas dos dois sismos precedentes (G_{i-2} , G_{i-1}), bem como do valor do intervalo de tempo entre essa ocorrência e a precedente (Dt_i), i. e.,

$$(Dt_i, G_{i-2}, G_{i-1}) \rightarrow G_i$$

- O Espaço - E é caracterizado pelo número da *zona sísmica* correspondente ao epicentro da ocorrência. Para gerar a localização da próxima ocorrência, E_i , é utilizado o valor da localização precedente (E_{i-1}) bem como da grandeza da ocorrência (G_i) e o intervalo de tempo entre essa ocorrência e a precedente (Dt_i) i. e.,

$$(Dt_i, G_i, E_{i-1}) \rightarrow E_i$$

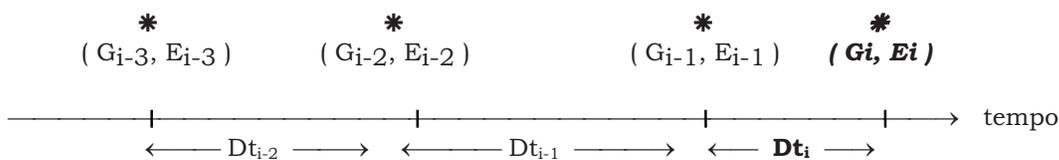


Figura 1: Diagrama representativo do modelo de simulação sísmica utilizado

Assim, para se iniciar a geração do processo de ocorrências sísmicas é necessário atribuir valores a Dt_{i-2} , Dt_{i-1} , G_{i-2} , G_{i-1} e E_{i-1} , ou seja, caracterizar as *condições iniciais*, isto é, o *passado sísmico recente*. No presente trabalho atribuíram-se às condições iniciais valores próximos dos valores médios dos factores intervenientes, partindo-se deste modo de um "cenário sísmico médio". Sabe-se que as condições iniciais têm influencia no processo de ocorrências sísmicas mas apenas para horizontes temporais bem mais pequenos do que os utilizados neste estudo. No estudo da influência das condições iniciais, Rodrigues e Costa (Rodrigues e Costa, 1997) verificaram que a influência das condições iniciais diminui à medida que aumenta o horizonte temporal, sendo

praticamente nula para horizontes temporais superiores a 90 dias. Como no presente estudo se vão considerar horizontes temporais bem maiores optou-se por considerar apenas condições iniciais correspondentes a um "cenário sísmico médio".

Para o factor Espaço, adoptou-se a definição de 21 *zonas sísmicas* na Península Ibérica proposta por Costa e Oliveira (Costa, 1989), (Costa e Oliveira, 1991), que abrangem a região delimitada por Longitude 15° W - 4° E , Latitude $34,5^{\circ}$ N - 44° N. Estas zonas foram reajustadas por Rodrigues e Costa (Rodrigues e Costa, 1997) por forma a suavizar os seus contornos, relativamente às *zonas sísmicas* propostas por Costa (Costa, 1989)). A figura 2 apresenta as zonas sísmicas reajustadas.

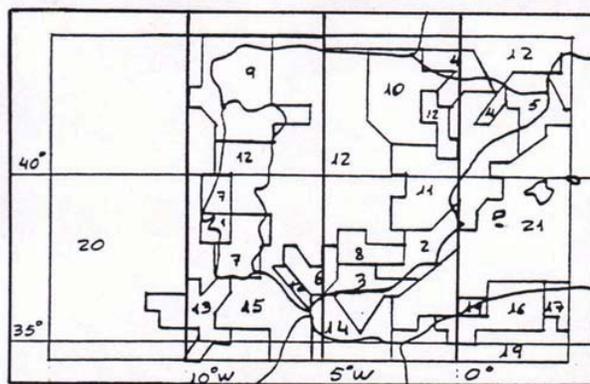


Figura 2: Zonas sísmicas da Península Ibérica

De referir ainda que o catálogo sísmico utilizado na calibração do modelo (Sousa et al, 1992), abrange uma área ligeiramente inferior à do catálogo utilizado aquando da definição das 21 *zonas sísmicas* atrás referidas, o que resulta na eliminação da *zona sísmica* número 18. Embora o número das *zonas sísmicas* passe então a 20, decidiu-se manter a numeração das *zonas sísmicas* anteriormente definida por Costa e Oliveira (Costa, 1989), (Costa e Oliveira, 1991), pelo que, as *zonas sísmicas* utilizadas neste trabalho serão referenciadas de 1 a 17 e de 19 a 21.

3 Metodologia utilizada

Para verificar se existe variação significativa da sismicidade ao longo do ano simulou-se o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica durante um longo horizonte temporal e registou-se o número de sismos ocorridos em cada mês. Se não houver diferença significativa do número de ocorrências ao longo do ano, a sismicidade "mensal" deverá ter valores idênticos ao longo do ano. Contudo, como nem todos os meses têm o mesmo número de dias, se se procedesse deste modo estar-se-ia a comparar períodos de tempo de durações diferentes.

Ter-se-á então de dividir o ano em períodos de tempo iguais, mas antes disso convém não esquecer que os anos têm 366 ou 365 dias, consoante sejam ou não bissextos. Como cada ano bissexto ocorre de quatro em quatro anos, cada ano tem efectivamente 365.25 dias.

Como o objectivo consiste em dividir o ano em períodos de tempo de igual duração a fim de se poder comparar o número de ocorrências sísmicas em cada um desses períodos, dividiu-se o ano, ou seja, um período de 365.25 dias por doze, obtendo-se assim períodos de tempo de 30.4375 dias, a que chamaremos **células** ou, quando isso não causar confusão **meses**. Desta forma, cada ano terá 12 células de igual duração.

Desde que não haja indicação contrária, neste trabalho os meses do ano corresponderão a períodos de tempo de 30.4375 dias, em que o mês de Janeiro será o período de tempo de 30.4375 dias com início no dia 1 de Janeiro do ano civil, Fevereiro o período de tempo de 30.4375 dias após o período anterior, etc. Esta designação, embora pouco usual não acarreta confusão, já que o objectivo consiste em avaliar a existência de variação significativa da sismicidade em períodos de tempo de igual amplitude ao longo do ano.

A Tabela 1 indica os períodos de tempo após 1 de Janeiro do ano civil e a correspondência adoptada para referir cada mês.

Tabela 1: Correspondência entre períodos de tempo e designação de meses adoptada

Período de tempo após 1 de Janeiro do ano civil (dias)	Designação de "meses" adoptada
[0 , 30.4375 [	Janeiro
[30.4375, 60.8750 [	Fevereiro
[60.8750, 91.3125 [	Março
[91.3125, 121.7500 [	Abril
[121.7500, 152.1875 [	Maió
[152.1875, 182.6250 [	Junho
[182.6250, 213.0625 [	Julho
[213.0625, 243.5000 [	Agosto
[243.5000, 273.9375 [	Setembro
[273.9375, 304.3750 [	Outubro
[304.3750, 334.8125 [	Novembro
[334.8125, 365.2500]	Dezembro

Seja c_{ij} o valor da sismicidade – número de sismos de qualquer magnitude - correspondente ao mês i no ano j .

Se se simularem N anos o número total de ocorrências em cada célula será

$$S_{i,N} = \sum_{j=1}^N c_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, 12$$

Se não existir variação significativa da sismicidade ao longo do ano a variável aleatória $S_{i,N}$ deverá ter distribuição Uniforme Discreta.

Para testar esta hipótese utilizaram-se os testes de ajustamento do Qui-Quadrado e de Kolmogorov-Smirnov para uma amostra, sendo a hipótese de nulidade:

H_0 : não existe diferença significativa entre os valores de $S_{i,N}$, $i = 1, 2, \dots, 12$.

De notar que embora o teste de Kolmogorov-Smirnov seja normalmente utilizado para distribuições contínuas, não se considerou relevante de o aplicar a valores mensais - células, dado o elevado número de observações em cada uma delas. Segundo Goodman e Kruscal (Goodman e Kruscal, 1954) quando o teste de Kolmogorov-Smirnov é aplicado a distribuições descontínuas o erro resultante é para o lado da segurança, isto é, o teste é conservativo, o que significa, neste caso, que se H_0 é rejeitada com base no teste podemos ter plena confiança na decisão.

Também Conover (Conover, 1971) apresenta uma metodologia para o teste de Kolmogorov-Smirnov que permite obter o valor crítico exacto de uma amostra descontínua, contudo não se achou necessário utilizá-la dada a natureza conservativa do teste.

Pode então concluir-se que se H_0 for rejeitada, com base nos testes estatísticos utilizados, existe diferença significativa nos valores da sismicidade mensal ao longo do ano.

Como também se pretende averiguar se, no caso de haver variação significativa da sismicidade ao longo do ano esta depende da magnitude dos sismos registados, o estudo será dividido em:

- sismos de qualquer magnitude;
- sismos de fraca magnitude - magnitude Richter menor do que 4;
- sismos de média magnitude - magnitude Richter entre 4 e 5 ($4 \leq G < 5$) e
- sismos de forte magnitude - magnitude Richter maior ou igual a 5.

Nas situações em que se detecte existir variação significativa da sismicidade ao longo do ano, a identificação dos meses em que a sismicidade é maior será feita com base no catálogo sísmico utilizado (Sousa et al, 1992), dado que o modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas utilizado não é adequado para tal análise, conforme se explicará na secção seguinte.

4 Variação da sismicidade ao longo do ano na Península Ibérica

4.1 Sismos de qualquer magnitude

Simulou-se o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica durante 1000 anos, utilizando o modelo de simulação referido anteriormente e registou-se o número de ocorrências sísmicas de qualquer magnitude.

Seja c_{ij} o número de ocorrências sísmicas de qualquer magnitude correspondente à célula i no ano j .

Calculou-se

$$S_{i,1000} = \sum_{j=1}^{1000} C_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, 12$$

Obtendo-se assim 12 valores da variável aleatória $S_{i,1000}$.

Na hipótese da sismicidade não ter variação significativa ao longo do ano, os valores de $S_{i,1000}$, $i = 1, 2, \dots, 12$ deverão ajustar-se a uma distribuição Uniforme Discreta.

Procedeu-se seguidamente ao teste da hipótese:

H_0 : os valores de $S_{i,1000}$, ($i = 1, 2, \dots, 12$) têm distribuição Uniforme Discreta

usando os testes de ajustamento do Qui-Quadrado e de Kolmogorov-Smirnov para uma amostra.

A tabela 2 apresenta os resultados dos testes estatísticos utilizados, verificando-se que, para um nível de significância de 5%, ambos os testes indicam dever-se rejeitar a hipótese de nulidade. Para um nível de significância de 1%, apenas o teste de Kolmogorov-Smirnov não aconselha rejeitar H_0 , o que não é de estranhar, visto que como já se disse, na situação estudada o teste é conservativo.

Tabela 2: Resultados da aplicação dos testes estatísticos utilizados considerando sismos de qualquer magnitude ocorridos na Península Ibérica

Teste do Qui-Quadrado		Teste de Kolmogorov-Smirnov	
$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
rejeitar H_0	rejeitar H_0	rejeitar H_0	não rejeitar H_0

α - nível de significância

Conclui-se assim que os valores da variável aleatória $S_{i,1000}$, ($i = 1, 2, \dots, 12$) não se ajustam à distribuição Uniforme, indicando que, no caso de ocorrências sísmicas de qualquer magnitude, existe diferença significativa entre os valores da sismicidade ao longo do ano.

Pretende-se agora identificar quais as células a que correspondem maiores valores de sismicidade.

De notar que, com base na análise efectuada, a $S_{1,1000}$ não corresponde necessariamente o número total de ocorrências registadas no mês de Janeiro, nem a $S_{2,1000}$ corresponde o número total de ocorrências registadas no mês de Fevereiro, etc., dado que o modelo de simulação utilizado gera apenas os intervalos de tempo entre ocorrências consecutivas.

Assim, dado um cenário sísmico inicial: valores de $D_{t_{i-2}}$, $D_{t_{i-1}}$, G_{i-2} , G_{i-1} e E_{i-1} , o modelo permite-nos gerar D_{t_i} , G_i e E_i , ou seja, o intervalo de tempo desde a última até à próxima ocorrência, a Grandeza da próxima ocorrência (expressa em magnitude Richter) e a sua localização (uma das zonas sísmicas do modelo de simulação utilizado). No entanto, é indiferente se se iniciou a contagem do tempo no dia 1 de Janeiro ou noutra data, visto que a sequência de valores gerados não depende do valor inicial do tempo mas sim, como já foi dito, dos intervalos de tempo entre as duas últimas ocorrências.

Levanta-se também a questão de saber se o cenário sísmico inicial poderá influenciar os valores de $S_{i,1000}$ ($i=1, 2, \dots, 12$). No estudo efectuada por Rodrigues e Costa (Rodrigues e Costa,1997) e (Rodrigues, 1998) prova-se que as condições iniciais exercem influência no processo de ocorrências sísmicas mas que essa influência diminui à medida que aumenta o horizonte temporal, sendo praticamente inexistente ao fim de 90 dias.

Como o horizonte temporal utilizado neste trabalho foi de 1000 anos não se coloca a questão da influência das condições iniciais.

Assim, os valores gerados de $S_{i,1000}$ ($i=1, 2, \dots, 12$) irão servir para avaliar a existência de variação significativa de sismicidade ao longo do ano. No caso de se verificar que tal variação é significativa, como aconteceu para sismos de qualquer magnitude na Península Ibérica, a identificação dos meses em que a sismicidade é maior será feita com base em dados reais, mais concretamente com base no catálogo sísmico já referido (Sousa et al, 1992).

No catálogo referido consideraram-se apenas os registos sísmicos após 1 de Janeiro de 1900, dado que os registos anteriores estavam muitas vezes incompletos. Deste modo, nos 91 anos considerados dispõe-se de 11309 registos.

Seja $d_{i,j}$ o número de sismos de qualquer magnitude registados na célula i do ano j , do catálogo utilizado ($i = 1, 2, \dots, 12$ e $j = 1, 2, \dots, 91$). O catálogo permite contabilizar $91 \times 12 = 1092$ valores de sismicidade. Com base nesta amostra, calculou-se o intervalo de confiança a 95% para o valor médio da sismicidade em períodos de 30.4375 dias. Seja $[l_i, l_s]$ esse intervalo.

Os valores médios mensais de sismicidade são

$$S_i = \sum_{j=1}^{91} d_{i,j} / 91, \quad i = 1, 2, \dots, 12,$$

isto é,

$$S_1 = \sum_{j=1}^{91} d_{1,j} / 91 - \text{somatório de todos os valores de sismicidade da primeira célula de cada ano dividido pelo número de anos considerados;}$$

$$S_2 = \sum_{j=1}^{91} d_{2,j} / 91 - \text{somatório de todos os valores de sismicidade da segunda célula de cada ano dividido pelo número de anos considerados;}$$

.....

$$S_{12} = \sum_{j=1}^{91} d_{12,j} / 91 - \text{somatório de todos os valores de sismicidade da décima segunda célula de cada ano dividido pelo número de anos considerados.}$$

Para os valores de S_i ($i = 1, 2, \dots, 12$) que ultrapassem o limite superior do intervalo de confiança para o valor médio da sismicidade em períodos de 30.4375 dias, l_s , considera-se que nesse mês a sismicidade foi elevada.

A figura 3 apresenta os valores de S_i ($i = 1, 2, \dots, 12$) bem como o valor de l_s para sismos de qualquer magnitude registados na Península Ibérica.

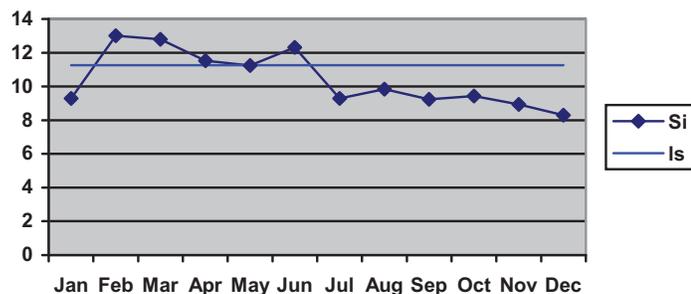


Figura 3: Valores médios mensais do número de sismos de qualquer magnitude ocorridos na Península Ibérica, bem como o valor de Is

Verifica-se a existência de dois picos de sismicidade mais elevada, um logo após o início do ano e outro sensivelmente a meio deste.

Conclui-se assim que a sismicidade mensal na Península Ibérica apresenta variação significativa ao longo do ano, existindo dois picos com sismicidade mais elevada, um nos meses de Fevereiro, Março e Abril e outro no mês de Junho.

4.2 Sismos de fraca magnitude

Tal como no estudo dos sismos de qualquer magnitude, simulou-se o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica durante 1000 anos, utilizando o modelo de simulação referido e registando-se agora apenas os sismos de fraca magnitude, isto é os sismos com magnitude Richter inferior a 4.

Seja cf_{ij} o número de ocorrências sísmicas de fraca magnitude correspondente à célula i no ano j .

Calculou-se

$$Sf_{i,1000} = \sum_{j=1}^{1000} cf_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, 12$$

Obtendo-se assim 12 valores da variável aleatória $Sf_{i,1000}$.

Na hipótese, do número mensal de sismos de fraca magnitude não ter variação significativa ao longo do ano os valores de $Sf_{i,1000}$, $i = 1, 2, \dots, 12$ deverão ajustar-se a uma distribuição Uniforme Discreta.

Procedeu-se seguidamente ao teste da hipótese:

H_0 : os valores de $Sf_{i,1000}$, ($i = 1, 2, \dots, 12$) têm distribuição Uniforme Discreta

usando os testes de ajustamento do Qui-Quadrado e de Kolmogorov-Smirnov para uma amostra.

Tabela 3: Resultados da aplicação dos testes estatísticos utilizados considerando sismos de fraca magnitude ocorridos na Península Ibérica

Teste do Qui-Quadrado		Teste de Kolmogorov-Smirnov	
$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
rejeitar H0	rejeitar H0	rejeitar H0	rejeitar H0

α - nível de significância

A tabela 3 apresenta os resultados dos testes estatísticos utilizados, verificando-se a existência de variação significativa do número mensal de sismos de fraca magnitude ao longo do ano. Com efeito, até para um nível de significância de 1%, ambos os testes utilizados conduzem à rejeição da hipótese em estudo.

De notar que a variação agora encontrada foi superior à detectada para sismos de qualquer magnitude, visto que para estes últimos, o teste de Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 1% não aconselhava a rejeição de H0.

Tal como no estudo de sismos de qualquer magnitude, utilizou-se catálogo sísmico já referido (Sousa et al, 1992), bem como a metodologia referida anteriormente.

Seja $df_{i,j}$ o número de sismos de fraca magnitude registados na célula i do ano j , ($i = 1, 2, \dots, 12$ e $j = 1, 2, \dots, 91$) do catálogo sísmico utilizado. Como já se referiu, o catálogo permite contabilizar $91 \times 12 = 1092$ valores mensais do número de sismos de fraca magnitude. Com base nesta amostra calculou-se o intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de sismos de fraca magnitude em períodos de 30.4375 dias. Seja $[li_f, ls_f]$ esse intervalo.

Os valores médios mensais do número de sismos de fraca magnitude são

$$Sf_i = \sum_{j=1}^{91} df_{i,j} / 91, \quad j = 1, 2, \dots, 12,$$

Para os valores de Sf_i que ultrapassem o valor do limite superior do intervalo de confiança para o valor médio do número de sismos de média magnitude em períodos de 30.4375 dias, ls_f , considera-se que nos correspondentes meses a sismicidade foi elevada.

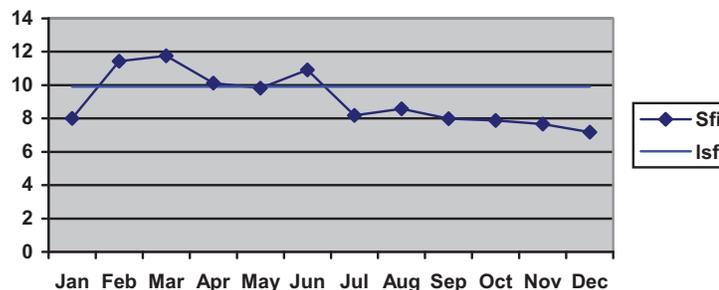


Figura 4: Valores médios mensais do número de sismos de fraca magnitude ocorridos na Península Ibérica, bem como o valor de ls_f

Verifica-se que a variação do número mensal de sismos de fraca magnitude ao longo do ano é muito semelhante à variação do número mensal de sismos de qualquer magnitude. Com efeito, tal como para sismos de qualquer magnitude, o número mensal de sismos de fraca magnitude apresenta dois picos, um logo após o início do ano e outro sensivelmente a meio deste. Ao primeiro pico correspondem os meses de Fevereiro, Março e Abril e ao segundo pico o mês de Junho.

4.3 Sismos de média magnitude

Consideraram-se sismos de média magnitude aqueles cuja magnitude Richter (G) se situou entre 4 e 5, isto é, $4 \leq G < 5$.

Simulou-se o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica durante 1000 anos, utilizando o modelo de simulação referido registando-se apenas as ocorrências de média magnitude.

Seja cm_{ij} o número de sismos de média magnitude registados na célula i do ano j . Calculou-se

$$Sm_{i,1000} = \sum_{j=1}^{1000} cm_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, 12$$

Considere-se a hipótese:

H_0 : os valores de $Sm_{i,1000}$, ($i = 1, 2, \dots, 12$) têm distribuição Uniforme Discreta

Tal como se tem vindo a fazer, utilizaram-se os testes do Qui-Quadrado e de Kolmogorov-Smirnov para uma amostra, tendo-se obtido os resultados que se apresentam na tabela 4.

Tabela 4: Resultados da aplicação dos testes estatísticos utilizados considerando sismos de média magnitude ocorridos na Península Ibérica

Teste do Qui-Quadrado		Teste de Kolmogorov-Smirnov	
$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
rejeitar H_0	não rejeitar H_0	rejeitar H_0	não rejeitar H_0

α - nível de significância

Para um nível de significância de 5% ambos os testes indicam que se deve rejeitar a hipótese. Para um nível de significância de 1% ambos os testes aconselham a não rejeitar a hipótese. Comparativamente à análise efectuada para sismos de fraca magnitude, em que ambos os testes aconselhavam a rejeição da hipótese, mesmo com um nível de significância de 1%, identifica-se uma menor variação nos valores de $Sm_{i,1000}$, $i = 1, 2, \dots, 12$. Embora continue a existir variação significativa do número mensal de sismos de média magnitude ao longo do ano, a variação é menos notória do que para os sismos de fraca magnitude.

Tal como anteriormente, para identificar os meses com maior número de sismos de média magnitude utilizou-se o catálogo sísmico.

Seja $dm_{i,j}$ o número de sismos de média magnitude registados na célula i do ano j , ($i = 1, 2, \dots, 12$ e $j = 1, 2, \dots, 91$). Com base na amostra de 1092 valores mensais do número de sismos de média magnitude extraídos do catálogo calculou-se o intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de sismos de média magnitude em períodos de 30.4375 dias. Seja $[li_m, ls_m]$ esse intervalo.

Os valores médios mensais do número de sismos de média magnitude são

$$Sm_i = \sum_{j=1}^{91} dm_{i,j} / 91, \quad i = 1, 2, \dots, 12,$$

Para os valores de Sm_i que ultrapassem o limite superior do intervalo de confiança para o valor médio do número de sismos de média magnitude em períodos de 30.4375 dias, ls_m , considera-se que nesse mês a sismicidade foi elevada.

A figura 5 apresenta os valores de Sm_i ($i = 1, 2, \dots, 12$) bem como o valor de ls_m .

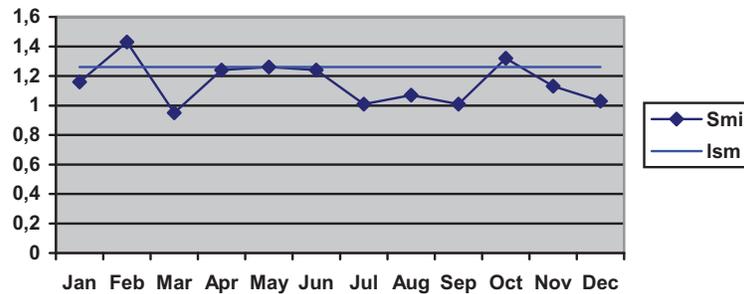


Figura 5: Valores médios mensais do número de sismos de média magnitude ocorridos na Península Ibérica, bem como o valor de ls_m

A distribuição mensal do número de sismos de média magnitude é consideravelmente diferente do que a observada para sismos de qualquer magnitude e fraca magnitude.

Verifica-se a existência de dois picos, o primeiro ocorre no mês de Fevereiro, onde anteriormente também se registavam valores elevados de sismicidade, e o segundo no mês de Outubro.

Conclui-se assim que o número mensal de sismos de média magnitude na Península Ibérica apresenta variação significativa ao longo do ano, embora esta variação seja menos notória do que a detectada para o número de sismos de fraca magnitude.

4.4 Sismos de forte magnitude

Simulou-se o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica durante 1000 anos, utilizando o modelo de simulação referido e registando-se apenas as ocorrências de forte magnitude.

Seja cfr_{ij} o número de sismos de forte magnitude registados na célula i do ano j .

Calculou-se

$$Sfr_{i,1000} = \sum_{j=1}^{1000} cfr_{ij}, i = 1, 2, \dots, 12$$

Tal como no caso de sismos de magnitudes anteriormente estudadas, se não existir variação significativa do número mensal de sismos de forte magnitude ao longo do ano, os valores de $Sfr_{i,1000}$, $i = 1, 2, \dots, 12$ deverão ajustar-se a uma distribuição Uniforme Discreta.

Considere-se a hipótese:

H_0 : os valores de $Sfr_{i,1000}$, ($i = 1, 2, \dots, 12$) têm distribuição Uniforme Discreta.

Utilizaram-se os testes do Qui-Quadrado e de Kolmogorov-Smirnov para uma amostra, tendo-se obtido os resultados que se apresentam na tabela 5.

Tabela 5: Resultados da aplicação dos testes estatísticos utilizados considerando sismos de forte magnitude ocorridos na Península Ibérica

Teste do Qui-Quadrado		Teste de Kolmogorov-Smirnov	
$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
não rejeitar H_0	não rejeitar H_0	não rejeitar H_0	não rejeitar H_0

α - nível de significância

Ambos os testes aconselham a não rejeição da hipótese, indicando assim não existir variação significativa do número mensal de sismos de forte magnitude ocorridos na Península Ibérica ao longo do ano.

Este resultado não é de estranhar, visto que no estudo efectuado com sismos de média magnitude se encontrou menor diferenciação do número de ocorrências mensais ao longo do ano do que no estudo efectuado com sismos de fraca magnitude.

5 Conclusões

O objectivo deste estudo foi o de averiguar a existência de variação significativa do número mensal de sismos ocorridos na Península Ibérica ao longo do ano.

Estudaram-se separadamente os sismos de:

- qualquer magnitude,
- fraca magnitude ($G < 4$),
- média magnitude ($4 \leq G < 5$) e
- forte magnitude ($G \geq 5$).

Tanto para os sismos de qualquer magnitude como para os sismos de fraca magnitude, verificou-se que existe variação significativa do número mensal de sismos ao longo do ano, existindo dois picos com sismicidade mais elevada, um nos meses de Fevereiro, Março e Abril e outro no mês de Junho.

Verificou-se também a existência de variação significativa do número mensal de sismos de média magnitude ao longo do ano, embora esta variação seja menos notória do que a detectada para o número de sismos de fraca magnitude. Neste caso, existem dois picos em que o número de sismos de média magnitude é mais elevado, correspondendo aos meses de Fevereiro e Outubro.

Para os sismos de forte magnitude não se detectou variação significativa do número mensal de sismos ao longo do ano na Península Ibérica.

Tabela 6: Meses em que o número de sismos foi elevado na Península Ibérica

magnitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
qualquer												
fraca												
média												
forte												

O quadro 6 apresenta os meses em que o número de sismos foi mais elevado na Península Ibérica.

Conclui-se assim que, na Península Ibérica, a variação mensal do número de sismos ao longo do ano se atenua com o aumento da magnitude considerada, verificando-se que para magnitudes superiores ou iguais a 5 não se detecta variação significativa.

6 Limitações e desenvolvimentos

Uma limitação deste estudo consiste no facto do modelo de geração do processo sísmico utilizado não permitir identificar quais os meses em que se registou maior número de sismos, obrigando assim à utilização de catálogos sísmicos para contornar esta questão.

Um desenvolvimento possível deste trabalho consiste na aplicação deste tipo de estudo a regiões mais pequenas, podendo inclusive utilizar-se a delimitação espacial definida pelas zonas sísmicas adoptadas no modelo de simulação utilizado. Contudo, esta diferenciação, embora permita um estudo mais detalhado, pode ser limitativa no que respeita ao número de sismos registados, sobretudo para sismos de forte magnitude, dado o reduzido número destes em pequenas áreas.

A abordagem seguida neste estudo poderá também ser estendida a outras regiões, permitindo verificar se existe variação significativa da sismicidade ao longo do ano noutras partes do globo, e em caso afirmativo, se as épocas de maior sismicidade correspondem às encontradas na Península Ibérica.

Dado que, como se verificou, na Península Ibérica existem meses em que o número de ocorrências sísmicas é significativamente maior de que noutros, a época do ano poderá ser considerada um precursor sísmico, podendo incorporar um sistema de alarme sísmico, como por exemplo, o proposto por Rodrigues (Rodrigues, 1998) e (Rodrigues, 2002) em que é possível aumentar o número de precursores sísmicos utilizados na atribuição de um grau de alarme sísmico para uma região, durante um horizonte temporal.

7 Referências

- Conover, W. J. (1971) *Practical Nonparametric Statistics*, Wiley, New. York.
- Costa, R. A. (1989) *Modelação do Processo Estocástico Sísmico na Península Ibérica*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Costa, R. A. ; Oliveira, C. S. (1991) *Defining seismic zones in the Ibero Mogrebi Region*. Proc. 9 Th. European Conference on Earthquake Engineering - Moscovo, pp. 279-288.
- Goodman, L.A.; Kruskal, W.H.(1954) *Measures of association for cross classifications*. J. Amer. Statistics. Ass., 49, pp. 732-764.
- Machado, F. (1955) *Alguns aspectos da sismicidade nos Açores*. Boletim da Ordem dos Engenheiros 4 (20), Memória 107, pp. 1-6.
- Nunes, João C.; Forjaz, Victor H.; França, Zilda. (2001) *Principais Sismos Destrutivos no Arquipélago dos Açores - Uma Revisão*. 5º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Açores, pp. 119-131.
- Rodrigues, M. Cecília M.; COSTA, Ruy A. (1997) *Estudo comparativo da influência das condições iniciais num modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica*. *Investigação Operacional*, Nº1 Vol. 17, pp. 23-40.
- Rodrigues, M. Cecília M. (1998) *Modelação de um Sistema de Alarme Sísmico para a Península Ibérica*. Dissertação de Doutoramento. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- Rodrigues, M. Cecília M. (2002) *Sistema de alarme sísmico baseado na sismicidade local e no passado sísmico recente*. *Investigação Operacional*, Nº1 Vol. 22, pp. 119-145.
- Sousa, M.L.; Martins, A.; Oliveira, C.S. (1992) *Compilação de Catálogos Sísmicos na Região Ibérica*. Relatório 36/92 - NDA, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

