

CATÁSTROFES MISTAS

UMA PERSPETIVA AMBIENTAL

IMPRESA DA
UNIVERSIDADE
DE COIMBRA
COIMBRA
UNIVERSITY
PRESS

LUCIANO LOURENÇO
ADÉLIA NUNES
(COORDS.)

RISCOS
E C A T Á S T R O F E S

I
IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS
U

ESTRUTURAS EDITORIAIS

Série Riscos e Catástrofes
Estudos Cindínicos

DIRETOR PRINCIPAL | MAIN EDITOR

Luciano Lourenço
Universidade de Coimbra

DIRETORES ADJUNTOS | ASSISTANT EDITORS

Adélia Nunes, Fátima Velez de Castro
Universidade de Coimbra

ASSISTENTE EDITORIAL | EDITORIAL ASSISTANT

Fernando Félix
Universidade de Coimbra

COMISSÃO CIENTÍFICA | EDITORIAL BOARD

Ana C. Meira Castro
Instituto Superior de Engenharia do Porto

António Betâmio de Almeida
Instituto Superior Técnico, Lisboa

António Duarte Amaro
Escola Superior de Saúde do Alcoitão

António Manuel Saraiva Lopes
Universidade de Lisboa

António Vieira
Universidade do Minho

Cármem Ferreira
Universidade do Porto

Helena Fernandez
Universidade do Algarve

Humberto Varum
Universidade de Aveiro

José Simão Antunes do Carmo
Universidade de Coimbra

Margarida Horta Antunes
Instituto Politécnico de Castelo Branco

Margarida Queirós
Universidade de Lisboa

Maria José Roxo
Universidade Nova de Lisboa

Romero Bandeira
Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar, Porto

Tomás de Figueiredo
Instituto Politécnico de Bragança

Antenora Maria da Mata Siqueira
Univ. Federal Fluminense, Brasil

Carla Juscélia Oliveira Souza
Univ. de São João del Rei, Brasil

Esteban Castro
Univ. de Newcastle, Reino Unido

José António Vega
Centro de Investigación Forestal de Lourizán, Espanha

José Arnaez Vadillo
Univ.de La Rioja, Espanha

Lidia Esther Romero Martín
Univ. Las Palmas de Gran Canaria, Espanha

Miguel Castillo Soto
Universidade do Chile

Montserrat Díaz-Raviña
Inst. Inv. Agrobiológicas de Galicia, Espanha

Norma Valencio
Univ. Federal de São Carlos, Brasil

Ricardo Alvarez
Univ. Atlântica, Florida, Estados Unidos da América

Victor Quintanilla
Univ. de Santiago de Chile, Chile

Virginia Araceli García Acosta
CIESAS, México

Xavier Ubeda Cartaña
Univ. de Barcelona, Espanha

Yvette Veyret
Univ. de Paris X, França

CATÁSTROFES MISTAS

UMA PERSPETIVA AMBIENTAL

IMPrensa DA
UNIVERSIDADE
DE COIMBRA
COIMBRA
UNIVERSITY
PRESS

LUCIANO LOURENÇO
ADÉLIA NUNES
(COORDS.)

EDIÇÃO

Imprensa da Universidade de Coimbra
Email: imprensa@uc.pt
URL: http://www.uc.pt/imprensa_uc
Vendas online: <http://livrariadaimprensa.uc.pt>

COORDENAÇÃO EDITORIAL

Imprensa da Universidade de Coimbra

CONCEÇÃO GRÁFICA

Imprensa da Universidade de Coimbra

PRÉ-IMPRESSÃO

Fernando Felix

INFOGRAFIA DA CAPA

Mickael Silva

PRINT BY

KDP

ISBN

978-989-26-1902-6

ISBN DIGITAL

978-989-26-1901-9

DOI

<https://doi.org/10.14195/978-989-26-1901-9>

RISCOS - ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE RISCOS, PREVENÇÃO E SEGURANÇA

TEL.: +351 239 992 251; FAX: +351 239 836 733

E-MAIL: RISCOS@UC.PT

© DEZEMBRO 2019, IMPRENSA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

CATÁSTROFES MISTAS

Catástrofes mistas : uma perspetiva ambiental / coord. Luciano Lourenço, Adélia Nunes. – (Riscos e catástrofes)

ISBN 978-989-26-1902-6 (ed. impressa)

ISBN 978-989-26-1901-9 (ed. eletrónica)

I – LOURENÇO, Luciano, 1951-

II – NUNES, Adélia, 1971-

CDU 551

SUMÁRIO

PREFÁCIO	7
INTRODUÇÃO	11
RISCOS MISTOS DE COMPONENTE ATMOSFÉRICA.....	17
Riscos atmosféricos mistos	
Ana Monteiro e Helena Madureira	19
RISCOS MISTOS DE COMPONENTE GEODINÂMICA	39
Risco de sismicidade induzida	
Bruno M. Martins	41
Risco de erosão hídrica do solo	
Adélia Nunes	51
Risco de erosão fluvial	
Adélia Nunes	77
Risco de erosão costeira	
António Campar de Almeida.....	109
Risco de erosão eólica	
António Campar de Almeida.....	155
Risco de erosão química	
António Campar de Almeida.....	195
Desertificação	
Maria José Roxo e Carlos Russo Machado	211
Riscos de salinização do solo	
Maria da Conceição Gonçalves, José Casimiro Martins e Tiago Brito Ramos	241
Riscos relacionados com intrusão salina	
Bruno M. Martins	269
Riscos de poluição	
Cármén Ferreira.....	279
Riesgos de incendio forestal	
Miguel E. Castillo Soto.....	313
CONCLUSÃO	361

(Página deixada propositadamente em branco)

PREFÁCIO

O terceiro dos volumes dedicados às Catástrofes trata daquelas que tanto podem ter uma origem natural, como podem ser provocadas pelo ser humano, razão pela qual as designamos por catástrofes mistas. Porque a maioria delas produz efeitos notórios sobre o ambiente, por vezes também são referidas como catástrofes ambientais, embora, neste caso, não seja tida em conta a sua origem, ou seja, as causas que as determinaram, mas sim as suas consequências, o que corresponde a um critério diferente daquele que esteve subjacente à divisão que usámos para organizar os três últimos volumes da Série.

Mas, porque muitas das consequências das catástrofes mistas se refletem exatamente sobre o ambiente, torna-se difícil traduzir esses efeitos em perdas de seres humanos, como fizemos nos dois volumes anteriores, já que mesmo quando elas existem, raramente ocorrem em simultâneo e, por conseguinte, não se tornam tão visíveis como sucede nas catástrofes naturais e antrópicas, em que o número de mortos provocados por um único acontecimento pode ser muito elevado.

Todavia e embora sendo mais raro, as catástrofes mistas também podem provocar muitas mortes, sendo suficiente estar atento às notícias para, de quando em vez, tomar conhecimento de algumas dessas consequências, traduzidas em número de mortes.

Apenas a título de exemplo, referimos duas notícias sobre os efeitos da poluição. Uma delas da autoria de Amber Milne, da *Thomson Reuters Foundation*, publicada no jornal O Globo, de 12 de março de 2019, intitulada: *Poluição mata mais do que cigarro, revela estudo internacional*, dava conta de que “cientistas constataam que 8,8 milhões de pessoas morreram em apenas um ano, mais do que as 7 milhões de vítimas anuais do tabagismo” (<https://oglobo.globo.com/sociedade/saude/poluicao-mata-mais-do-que-cigarro-revela-estudo-internacional-23515245>).

Uma outra notícia, publicada no Público de 4 de abril de 2019, da autoria de Sofia Neves, intitulada *Só em 2017 morreram 3540 pessoas devido à poluição atmosférica em Portugal*, dava conta de que “a poluição do ar foi o quinto principal causador de mortes prematuras em todo o mundo: 4,9 milhões. Em Portugal, o problema

matou pelo menos 3540 pessoas. Os países em desenvolvimento são os mais afectados, mas os casos mais graves continuam a ser a China e a Índia” (<https://www.publico.pt/2019/04/04/ciencia/noticia/quase-dez-mortes-2017-causados-poluicao-atmosferica-1867924>).

E porque, na altura em que estou a redigir este prefácio, as notícias são sobre os grandes incêndios florestais que, de novo, voltaram ao Centro de Portugal, não posso deixar de referir o trabalho da Agência Lusa, publicado no Observador de 18 de junho de 2017, na sequência do incêndio florestal de Pedrógão Grande, registado no dia anterior e de triste memória, com o título: *Os incêndios que mais mataram no mundo*, dando conta de que aquele que mais vítimas mortais causou ter-se-á sido registado em 1871, nos Estados Unidos. “*O incêndio florestal mais mortífero parece ter sido o de outubro desse ano, em Peshtigo (Wisconsin), que causou entre 800 e 1 200 mortos, segundo as estimativas. O incêndio, que tinha deflagrado na floresta há uns dias, destruiu em algumas horas a localidade de 1 700 habitantes, bem como outras 16 vilas, numa área de mais de 500 000 hectares*” (<https://observador.pt/2017/06/18/os-incendios-que-mais-mataram-no-mundo/>). Depois, seguia-se a lista com o número de vítimas mortais provocados por outros grandes incêndios.

Como é sabido, em Portugal o ano com maior número de mortos foi o de 2017, num total de 121, sobretudo vítimas dos incêndios de 17 de junho e 15 de outubro, como refere a Sábado, um ano depois, a 16 de junho de 2018, num texto da Lusa com o título “*Está ‘tudo’ por fazer para que Pedrógão não regresse ao pré-incêndios*”. Entre outros aspetos, menciona expressamente:

“O incêndio que deflagrou há um ano em Pedrógão Grande (distrito de Leiria), em 17 de Junho, e alastrou a concelhos vizinhos provocou 66 mortos e cerca de 250 feridos.

As chamas, extintas uma semana depois, destruíram meio milhar de casas, 261 das quais habitações permanentes, e 50 empresas.

Em Outubro, os incêndios rurais que atingiram a região Centro fizeram 50 mortes, a que se somam outras cinco registadas noutros fogos, elevando para 121 o número total de mortos em 2017” (<https://www.sabado.pt/portugal/detalhe/esta-tudo-por-fazer-para-que-pedrogao-nao-regresse-ao-pre-incendios>).

Com efeito, os grandes incêndios florestais são um bom exemplo de catástrofes de origem mista, não tanto, felizmente, pelo número de mortos, mas sobretudo

pela destruição de diversos tipos de bens e haveres, bem como de extensas áreas de património florestal e, ainda, pelas graves consequências socioeconómicas e ambientais que acarretam *a posteriori*.

De facto, muitas das catástrofes que serão abordadas neste volume, não se traduzem diretamente num elevado número de mortos, mas antes fazem sentir os seus efeitos sobre o ambiente e, deste modo, indiretamente, sobre a população que, por vezes, só mais tarde acaba por ser afetada.

Porventura, as catástrofes mistas que permitem uma quantificação mais direta do número de mortos resultam da plena manifestação dos riscos biomédicos, também designados por riscos do foro infecto-contagioso, em resultado da atuação de microrganismos e parasitas, que podem ser transmitidos por vectores biológicos (vírus e bactérias), por ingestão de água e alimentos, por contágio de sangue contaminado e secreções orgânicas, por inalação e, ainda, por mais de que um dos mecanismos anteriores. Todavia, a conclusão deste capítulo foi mais demorada do que o inicialmente previsto e, para não atrasar mais a publicação deste volume, por opção dos autores foi decido publicá-lo mais tarde, num outro tomo dedicado ao assunto.

Depois desta breve nota sobre algumas das consequências das catástrofes mistas, esperamos ter aguçado o apetite do leitor para não só se embrenhar nas páginas seguintes, onde estes temas serão tratados de forma mais profunda, mas também para se empenhar na investigação das catástrofes mistas, uma área científica que ainda carece de muita pesquisa.

Coimbra, 23 de julho de 2019

Luciano Lourenço

(Página deixada propositadamente em branco)

INTRODUÇÃO

Adélia Nunes

Departamento de Geografia e Turismo da Faculdade de Letras
CEGOT e RISCOS, Universidade de Coimbra, Portugal
ORCID: 0000-0003-3927-0748 adelia.nunes@ci.uc.pt

Os riscos mistos, de componente ambiental, associam-se a fenómeno potencialmente perigosos com causas combinadas, ou seja, para a sua manifestação concorrem condições naturais e/ou ações antrópicas. Resultam, assim, da combinação de ações continuadas da atividade humana com o funcionamento dos sistemas naturais, incluindo-se neste conjunto os incêndios florestais, a contaminação de cursos de água e aquíferos e a degradação e contaminação dos solos. Na terminologia sobre a Redução de Risco de Catástrofes do UNISDR emergem como riscos sicionatu-rais, pois estão associados à combinação de factores naturais e antropogénicos, enfatizando a degradação ambiental e as mudanças climáticas. Acrescentam, ainda, que podem ser riscos químicos, naturais e biológicos, e resultar da degradação ambiental ou da poluição física ou química do ar, da água e do solo. No entanto, muitos dos processos e fenómenos que se enquadram nesta categoria podem ser, também, considerados “*driving forces*” de outros riscos como a degradação do solo, a desfloresta-ção, a perda de biodiversidade, a salinização e o aumento do nível do mar.

Na obra que agora se apresenta analisam-se dois tipos principais de riscos: (i) os riscos mistos de componente atmosférica, quando, além do factor antrópico, se produzem no seio da atmosfera e os (ii) riscos mistos de componente geodinâmica, quando, além da ação antrópica, se relacionam com forças (geodinâmica interna) e processos (geodinâmica externa) que atuam sobre a Terra.

Nos riscos de componente atmosférica, no capítulo intitulado “*Riscos atmosfê-ricos mistos*”, as autoras, Ana Monteiro e Helena Madureira, pretendem identificar algumas das ameaças provenientes da atmosfera que podem causar, direta ou indiretamente, perdas e danos severos para os seres humanos, assim como a sua distribuição planetária. Entre a multiplicidade de riscos que podem ser identificados, abordaram três com grande relevância científica e mediatismo social, associados às alterações na composição química da atmosfera, e dois menos valorizados nos

planos de prevenção, como a queda de meteoritos e os resultantes das pesquisas espaciais. A redução de espessura da camada de ozono, o agravamento do efeito de estufa e a poluição da atmosfera por terem sido identificados como ameaças severas, tanto os estímulos como as consequências têm sido descritos e bastante divulgados na sociedade. Concluem, todavia, que a valorização destes riscos ainda se encontra fortemente condicionada pela magnitude das consequências, diretas e imediatas, e pelo contexto social, económico e político dos alvos.

A abordagem aos Riscos Mistos de componente geodinâmica inicia-se como o capítulo “*Risco de sismicidade induzida*”, da autoria de Bruno Martins. De acordo com o Autor, a génese antrópica de sismos, em reservatórios, minas, campos de petróleo e gás e injeção de fluidos justificam-se, fundamentalmente, pelas mudanças de pressão introduzidas sobre a estrutura geológica, modificadoras das pressões neutras nas falhas, no volume, forças aplicadas e carga. Acrescenta, ainda, que a dimensão da estrutura influi no impacto sobre a área crustal, sugerindo que quanto maior for, maior será o risco de sismicidade.

Os capítulos subsequentes, relacionados com a erosão (geodinâmica externa), têm como denominador comum a água enquanto agente erosivo. A erosão assume, assim, diversas formas: pluvial, resultante das águas das chuvas; fluvial, causada pela água que flui nas linhas de água; costeira, consequência da ação das águas do mar; química, através da reação dos materiais minerais das rochas à água, levando a formação de novos minerais (argilas) e sais solúveis. O “*Risco de erosão hídrica do solo*”, da autoria de Adélia Nunes, sintetiza os tipos e os principais fatores que interferem na erosão hídrica em vertentes. Analisam-se alguns dos principais métodos usados na sua avaliação/monitorização, assim com as atividades antrópicas que mais têm contribuído para acelerar estes processos, bem como as respetivas consequências e algumas medidas de mitigação. Com efeito, a erosão por efeito da água da chuva constitui um dos principais processos de degradação da camada edáfica superficial, à escala global, ameaçando a produtividade agrícola do solo e a estabilidade económica e social de diversas regiões do globo. No capítulo seguinte, da mesma autora, intitulado “*Risco de erosão fluvial*” analisa-se a dinâmica fluvial, enfatizando-se os agentes e processos que atuam ao nível do escavamento, transporte e deposição de sedimentos. São também abordadas as principais formas resultantes, os fatores

intervenientes, alguns dos métodos utilizados na avaliação do transporte de sedimentos e na erosão lateral, assim como na sua proteção.

António Campar de Almeida, autor dos três capítulos que se seguem, debruça-se em primeiro lugar sobre os “*Riscos de erosão costeira*”, discutindo as condições naturais terrestres e marinhas mais favoráveis à ação dos processos perigosos, assim como o aumento da exposição humana a esses processos. São abordadas as dinâmicas próprias da costa de arriba e da costa arenosa baixa e são analisadas as medidas que têm sido tomadas para combater ou mitigar a erosão costeira e possíveis adaptações. No capítulo que intitula “*Risco de erosão química*”, o autor refere que os principais processos químicos que se verificam à superfície da crosta terrestre têm como principal interveniente a água, quer como meio de reação quer como reagente. Assim, entre os múltiplos processos que podem ocorrer, aborda a hidratação, a dissolução, a hidrólise, a oxidação e a redução. São, igualmente, analisados alguns dos efeitos mais evidentes da ação destes processos, quer na natureza quer em construções humanas. Problematisa, também, algumas das alterações que se verificarão, em termos da generalidade dos processos químicos, na sequência das mudanças climáticas previstas.

No capítulo, com o título “*Riscos de erosão eólica*”, também da autoria de António Campar de Almeida, o vento assume-se como agente erosivo, cujos modos de atuar sobre as rochas e de destruir ou construir geoformas são muito diferenciados. Assim, depois de analisar como atua o vento, apresenta o modo como modela a paisagem nas regiões áridas e como pode afetar os solos das regiões semiáridas. Por último, discute algumas das medidas usadas para minimizar os efeitos da erosão eólica, tanto em solos como em dunas, assim como as adaptações humanas a essa erosão.

Maria José Roxo e Carlos Russo Machado, no seu capítulo “*Desertificação*”, descrevem este processo como gradual, marcado pela perda de produtividade do solo e de diminuição da cobertura vegetal, em consequência da interação das atividades humanas com as condições ambientais marcadas por situações de seca e aridez. Analisam a sua dimensão planetária, os processos envolvidos, as consequências, a sua evolução e discutem o papel de organizações como as Nações Unidas e a União Europeia no combate à desertificação, identificando os mecanismos, instrumentos e estratégias adotadas para minimizar os seus efeitos. O “desaparecimento do Mar

de Aral” e o fenómeno da desertificação na Península Ibérica, constituem os estudos de caso. No final, são perentórios quanto à necessidade, perante um cenário em que as alterações climáticas são bem evidentes, dos governos e dos cidadãos, em todo o mundo, terem o conhecimento da dimensão, das causas, consequências e de algumas medidas de mitigação/adaptação aos processos de desertificação.

“*Riscos de salinização do solo*”, de Maria da Conceição Gonçalves, José Casimiro Martins e Tiago Brito Ramos, e “*Riscos relacionados com intrusão salina*”, de Bruno Martins, abordam as questões da salinização, enquanto processos de degradação do solo e dos aquíferos, a nível mundial. Embora o problema de salinização do solo pareça limitado às zonas costeiras afetadas pelas marés (sapais) e a algumas áreas regadas no sul do País (Alentejo), o aumento do regadio e as perspetivas de mudanças climáticas para as próximas décadas, nomeadamente, o aumento das temperaturas e da concentração de sais solúveis na água de rega, podem levar a um acréscimo da área afetada em Portugal e a uma crescente degradação dos solos.

Por outro lado, a excessiva extração de água doce, devido à crescente pressão demográfica nas áreas costeiras, aliada a uma agricultura intensiva, exigentes em consumo de água, têm conduzido a uma penetração da água salgada para áreas mais continentais, responsável pela denominada intrusão salina em aquíferos. Os problemas relacionados com a intrusão salina são mundiais e têm-se agravado ao longo das últimas décadas, com consequências severas para o ambiente, as populações, a economia e a sociedade. De acordo com o autor, B. Martins, a diminuição do risco dependerá em boa parte das estratégias de redução das vulnerabilidades que passarão, necessariamente, por um planeamento e gestão global dos recursos hídricos objetivada num princípio de desenvolvimento sustentável.

O capítulo “*Riscos de poluição*”, de autoria de Carmén Ferreira, inicia-se com a discussão dos termos “poluição” *vs.* “contaminação”, concluindo que que um solo ou uma massa de água pode estar contaminado/a mas não poluído/a, todavia se estiver poluído/a está, obviamente, contaminado/a. Enfatizando os efeitos adversos da ação antrópica nestes dois recursos estratégicos, o solo e a água, dos quais depende o futuro da Humanidade, reforça a necessidade de um controlo da ocupação do solo urbano, das práticas agrícolas e industriais e o respeito pelo cumprimento da legislação relativa a estes recursos, tendo em conta a sua gestão baseada nos princípios de sustentabilidade.

O último dos capítulos desta obra, “*Riesgos de incendio forestal*”, da autoria de Miguel E. Castillo Soto, analisa a incidência geográfica dos incêndios florestais, numa perspetiva multiescalar, desde o global, com o intuito de definir macro zonas de ocorrência, ao particular, ou seja, através da análise de alguns exemplos de incêndios particularmente catastróficos, onde se incluem os incêndios de junho e outubro de 2017 em Portugal. Com efeito, entre os riscos mistos, os incêndios florestais têm merecido maior destaque sobretudo pela sua dimensão global, pelos impactes que provocam nas diferentes componentes da natureza e da sociedade. Apesar de fazerem parte da história da humanidade, os incêndios florestais representam, na atualidade, uma das mais importantes ameaças às funções e serviços dos ecossistemas, de que dependem o bem estar e a qualidade de vida da população.

(Página deixada propositadamente em branco)

**RISCOS MISTOS
DE COMPONENTE
GEODINÂMICA**

(Página deixada propositadamente em branco)

RISCO DE SISMICIDADE INDUZIDA

INDUCED SEISMICITY RISK

Bruno M. Martins

Departamento de Geografia e Turismo da Faculdade de Letras
CEGOT, Universidade de Coimbra, Portugal
ORCID: 0000-0001-8681-2349 bruno.martins@uc.pt

Sumário: Entende-se por sismicidade induzida toda atividade sísmica resultante, de forma direta ou indireta, da atividade antrópica. Os mecanismos indutores relacionam-se, fundamentalmente, com as mudanças de pressão introduzidas sobre a estrutura geológica, subsequentemente modificadoras das pressões sobre a estrutura tectónica. São atribuídos sismos de génese antrópica a reservatórios, minas, campos de petróleo e gás e injeção de fluidos. Alguns exemplos são descritos neste capítulo, procurando demonstrar a pertinência dos trabalhos consagrados ao estudo deste risco.

Palavras-chave: Risco de sismicidade induzida, sismos, reservatórios.

Abstract: Induced seismicity is understood as all seismic activity resulting, directly or indirectly, from human activity. The inductive mechanisms are fundamentally related to the pressure changes imposed on the geological structure, which then increase the modifying pressures on the tectonic structure. Human-induced seismicity is attributed to reservoirs, mines, oil and gas fields and fluid injection. Some examples are described in this chapter, with a view to demonstrating the usefulness of research into this hazard.

Keywords: Risk of induced seismicity, earthquakes, reservoirs.

Introdução

Os primeiros trabalhos de sismos relacionados com a atividade antrópica remontam a 1894, altura em que foram detetados um conjunto de abalos atribuídos à exploração de ouro, nas minas Witwatersrand, na África do Sul (McDonald, 1982; McGarr *et al.*, 2002). Na região de Bochum, na Alemanha, em 1908 é montado pela primeira vez um observatório sismológico de monitorização e, anos mais tarde, em 1920, na bacia carbonífera da Alta Silésia, na Polónia (Gibowicz e Kijko, 1994), com o objetivo de aprofundar o conhecimento do impacto da exploração das minas de carvão na atividade sísmica da região.

Ulteriormente, um conjunto alargado de atividades e estruturas foram aventadas como causadoras de sismos, tais como, grandes reservatórios, campos petrolíferos e de gás, exploração de minas e pedreiras, e injeção de fluidos a elevada pressão. O estudo da sismicidade de origem antrópica é hoje arduamente trabalhado, sobretudo no que respeita a eventos sísmicos de elevada magnitude com localização de hipocentros em camadas médias crustais (McGarr *et al.*, 2002).

Entende-se por sismicidade induzida toda a atividade sísmica resultante, de forma direta ou indireta, da atividade antrópica. Os mecanismos considerados como responsáveis relacionam-se fundamentalmente com mudanças de pressão introduzidas sobre a estrutura geológica, subsequentemente modificadoras das pressões sobre a estrutura tectónica (Bossu, 1996; McGarr e Simpson, 1997).

As dificuldades que ainda hoje subsistem na explicação, clara e inequívoca, dos mecanismos geradores dos sismos de génese natural, contrastam com os de origem antrópica. Estes beneficiam do facto de poderem ser analisados com maior detalhe, o que contribui para uma melhor compreensão dos processos geradores, em especial, nas áreas onde a sismicidade natural é baixa (McGarr *et al.*, 2002).

A monitorização sísmica assume desde logo um papel central nos estudos de sismicidade induzida, devendo ser iniciada antes de qualquer perturbação e permanecer após a instalação de qualquer grande obra ou projeto de engenharia, uma vez que os registos de maior sismicidade ocorrem, geralmente, nos períodos subsequentes (Ribotta, 1989). Atualmente, é comum a monitorização sísmica logo nos

estágios iniciais de forma a permitir uma melhor compreensão e caracterização da região do ponto de vista sismológico.

A monitorização deverá ter em conta qualquer modificação ao nível dos movimentos do solo, mas também, e sempre que possível, dados geodésicos, poro-presão, piezometria, bem como, dados de natureza industrial e de engenharia (Idalina *et al.*, 2006). Alguns trabalhos, por falta de uma coleta de informação detalhada, resultaram em conclusões arrefigadas de alguma ambiguidade (Roeloffs, 1988).

A monitorização sísmica contínua implica, necessariamente, a gestão de uma grande quantidade de informação. A detecção de eventos sísmicos em modo contínuo é feita, quer visualizando todo o registo, quer a partir do recurso a programas automáticos de detecção, que deverão ser ajustados consoante as características do sinal que se pretende detectar. Recorrendo à componente de informação vertical do sinal contínuo, é então possível criar espectrogramas diários que rapidamente identificam e localizam no tempo os sinais sísmicos, fornecendo dados sobre a sua amplitude, frequência e duração.

É frequente a monitorização de dois grupos de sinais: curtos e impulsivos; longos e emersos. Os primeiros são de maior amplitude, sendo a sua duração de apenas 1 a 2 segundos. Têm características impulsivas, compressivas e são praticamente coincidentes com o momento exato em que se verifica, por exemplo, uma explosão (Idalina *et al.*, 2006). Os sinais longos e emersos duram cerca de 20 a 30 segundos e têm baixos valores de amplitude e velocidade de vibração.

A monitorização sísmica deverá ainda contemplar a comparação de dados provenientes de registos de escala regional, de forma a melhorar a qualidade e precisão do cálculo dos hipocentros.

Reservatórios

É sobretudo a partir de 1970 que surge um conjunto alargado de trabalhos consagrados ao estudo da sismicidade associada a grandes reservatórios (Gevin, 1979). Por essa altura, a Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultu-

ra (UNESCO) participou ativamente na discussão dos efeitos da sismicidade sobre a segurança das grandes barragens e albufeiras.

A atividade sísmica despoletada pelos grandes reservatórios de água está associada às elevadas pressões que a água exerce nos sectores de fundação, de que resultam forças aplicadas e uma distribuição das tensões efetivas. Arroga-se ainda o volume de água do reservatório e a carga adicional que preconiza no acréscimo significativo da tensão elástica. Esse aumento pode acelerar o processo de libertação de energia através de sismos, caso o limite elástico do material rochoso seja ultrapassado (Câmara, 1992).

Por outro lado, imputasse a estas estruturas perturbações no equilíbrio da base geológica que as sustenta, modificando as pressões neutras das falhas ativas anteriormente presentes, admitindo-se, portanto, que despolete, por este mecanismo, a ocorrência de sismos (Câmara, 1992).

De um modo geral, o risco é maior na fase de enchimento e no período subsequente, que pode ser estendido até aos 3 anos, onde é comum o aumento significativo da atividade sísmica local (Ribotta, 1989).

Vários estudos sugerem a profundidade, o volume de água do reservatório, a presença de falhas ativas e as características litológicas como os fatores que mais influem no risco sísmico (Baecher e Keeney, 1982). É habitual o registo diário da profundidade da água (geralmente calculado a partir do setor mais profundo do reservatório), bem como, o volume de água (calculado a partir da geometria do reservatório). Mais recentemente é ainda monitorizado, a partir de perfurações, os níveis piezométricos, de forma a analisar o impacto sobre o regime hidrológico subterrâneo.

O risco de sismicidade é maior em reservatórios mais profundos e largos, em zonas de cisalhamento, presença de falhas ativas e em áreas cuja litologia predominante são formações sedimentares (Seeber *et al.*, 1996).

O maior sismo atribuído a um grande reservatório registou-se a 10 de dezembro de 1967, em Koyna, Índia (Gupta and Rastogi, 1976). Tratou-se de um abalo de magnitude 6,5 numa região de baixa sismicidade natural. A barragem registava uma profundidade de 75 metros. O comprimento no ponto máximo era próximo dos 52 quilómetros (Gupta and Rastogi, 1976). Os sismos ocorridos posteriormente,

de magnitudes significativas, foram atribuídos às mudanças no volume de água do reservatório. A subida da cota de água máxima em cerca de 1 metro, terá sido responsável em 1973, pelo abalo sísmico de magnitude de 5,2 atribuído ao aumento da tensão sobre um conjunto de falhas próximas da barragem (Gupta, 1985).

A ocorrência de um sismo de magnitude 5,3 em novembro de 1981, em Lake Nasser, no Egito, foi imputado à barragem de Aswan. Neste caso, trata-se de uma albufeira relativamente pouco profunda, cuja cota do nível da água não ultrapassava os 10 metros, mas cujo comprimento era próximo dos 60 quilómetros. Trata-se de uma área tectonicamente ativa, sem contudo, ter sido registado algum sismo de magnitude igual ou superior ao ocorrido. O preenchimento dos poros do arenitona base do reservatório, por infiltração e posterior colmatção, terá aumentado o efeito de carga, contribuindo desta forma para o despoletar do sismo (Simpson *et al.*, 1990).

Os mecanismos de desencadeamento de sismos associados aos grandes reservatórios são geralmente os mais complexos, em parte, devido a uma questão de escala de grandeza. Geralmente, a área afetada é maior e os impactos mais significativos sobre a estrutura geológica da área onde se inserem, relacionado, fundamentalmente, com o carga e a compactação do espaço poroso (McGarr *et al.*, 2002). A resposta sísmica é por vezes muito encurtada no tempo (relacionada com a resposta elástica instantânea), outras mais retardada (relacionada com a difusão do fluido) (Simpson *et al.*, 1988).

A geometria do reservatório, o volume de água e tipo de litologia são os fatores que mais influência exercem sobre a tensão aplicada. Alguns estudos, baseados em modelos elásticos simples, sugerem que a tensão em profundidade corresponde, no máximo, a 10% da profundidade do reservatório (Bell e Nur, 1978). Assim, um reservatório com uma profundidade de 100 metros causaria tensão hipocentral máxima de 0.1 MPa (megapascal). Assim, o risco de sismicidade é superior em reservatórios maiores. No entanto, casos há de grandes reservatórios localizados em áreas sem qualquer registo sísmico significativo (McGarr, 2002).

Outros estudos atribuem a diversidade litológica e as características estruturais como fatores que mais influenciam sobre a tensão necessária a aplicar sobre uma falha de forma a despoletar um abalo (Simpson e Narasimhan, 1990).

Outras causas

São ainda imputados à exploração de minas e pedreiras, e às atividades nelas desenvolvidas, como mineração de superfície, bombeamento e inundações generalizadas, fatores causadores de sismicidade, bem como, a injeção de fluidos a elevadas pressões.

Um exemplo paradigmático foi o verificado em Denver, Colorado, nos anos 60 do século passado, onde um sismo foi sentido imediatamente após a injeção de um fluido a cerca de 3,7 quilómetros de profundidade, nas Rocky Mountain Arsenal (Evans, 1966; Healy *et al.*, 1968). Trata-se de uma área de sismicidade natural muito baixa. O abalo inicialmente ocorreu muito próximo do local da injeção do fluido, passando, mais tarde, a ser sentido ao longo de um plano longitudinal, com cerca de 8,7 quilómetros. Um ano após cessarem as injeções, foram registados um conjunto de abalos, dos quais, o de maior magnitude atingiu os 4,85.

Os vários exemplos de sismos associados a injeções de fluidos mostram que a sismicidade tende a ocorrer em áreas com falhas preexistentes, ligadas do ponto de vista hidráulico, aos pontos de injeções. A atividade sísmica está geralmente confinada aos locais onde a falha denota menor resistência hidráulica. Inicialmente a resposta sísmica tende a ser próxima dos locais de injeção, por aumento de pressão. Posteriormente, são aumentados os tempos de respostas e a áreas de alcance (Nicholson e Wesson, 1990). A pressão e o volume do fluido é parâmetro chave que carece de monitorização.

São também frequentes sismos em pedreiras. Em 1974, foi registado um abalo sísmico de magnitude 3,3 com o hipocentro localizado a cerca de 0,5-1,5 quilómetros de profundidade numa extensa área de pedreiras, próximo de Wappingers Falls, Nova Iorque. O início da atividade remonta a 1900, tendo sido escavado desde então, material rochoso que terá baixado a cota basal em cerca de 50 metros, facto que terá tido consequências sobre a mudança de pressão próxima da superfície em cerca de 1,5 MPa (Sbar e Sykes, 1973). A ela imputasse a diminuição da pressão normal sobre as falhas e o aumento da

pressão de cisalhamento, numa área caracterizada por um comportamento tectónico, fundamentalmente de componente horizontal e compressiva (Pomeroy *et al.*, 1976).

O efeito de bombeamento de água nas pedreiras tem sido aventado como outro factor responsável pela despoletar de abalos sísmicos. A remoção de quantitativos avultados de água diminui a poro pressão cujo impacto é, por vezes, suficiente para desencadear um sismo. É o caso da sequência de abalos ocorridos entre 1992 e 1997, em Cacoosing Valley, Pensilvânia e na região de Belchatow, na Polónia (Gibowicz *et al.*, 1981).

Por seu turno, é atribuído às inundações em áreas mineiras e em pedreiras a ocorrência de abalos sísmicos por aumento de poro pressão, como é o exemplo das minas de Falconbridge, no Canadá (Wetmiller *et al.*, 1993).

A sismicidade associada à extração de fluidos em campos de petróleo remonta às primeiras décadas do século XX (Yerkes e Castle, 1976). O risco é mais elevado quando a poro pressão diminui nas suas imediações em cerca de 10 MPa. Os sismos tendem a ocorrer sob os reservatórios, principalmente em áreas de comportamento tectónico compressivo.

Pennington *et al.* (1986) analisou um conjunto de sismos que ocorreram em campos de petróleo e gás, no sul do Texas, tendo sido registados abalos de magnitude de 3,9. Grasso e Wittlinger (1990) fizeram-no em campos de gás na bacia de Pau, em França, onde registaram sismos de magnitude 4,2. Os abalos parecem resultar da resposta isostática face à remoção de petróleo e água, ainda que compensada pela injeção de fluidos, especialmente em áreas de comportamento tectónico compressivo (McGarr, 1991).

A resposta sísmica parece estar relacionada com a dimensão dos campos de petróleo e de gás. A magnitude do maior sismo registado foi de 7, em Gazli, Uzbequistão, ocorrido em abril e maio de 1976 e, mais tarde, em março de 1984, com hipocentros localizado a 20, 13 e 15 quilómetros de profundidade respetivamente. Tratara-se de um extenso campo de petróleo, com cerca de 49 quilómetros de comprimento, numa região de fraca sismicidade natural (Bossu, 1996).

Conclusões

São atribuídos sismos de génese antrópica a reservatórios, minas, campos de petróleo e gás e injeção de fluídos, justificados, fundamentalmente, pelas mudanças de pressão introduzidas sobre a estrutura geológica, subsequentemente modificadoras das pressões neutras nas falhas, no volume, forças aplicadas e carga. Os estudos de sismicidade induzida são particularmente interessante nas regiões de fraca sismicidade natural, onde este fenómeno se torna mais claro, permitindo uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos.

A dimensão da estrutura influi no impacto sobre a área crustal, sugerindo que quanto maior for, maior será o risco de sismicidade. Casos há, no entanto, de grandes estruturas localizadas em áreas onde nunca ocorreu qualquer registo de abalos sísmicos significativos (McGarr *et al.*, 2002).

Aos grandes reservatórios são imputados os sismos de maior magnitude, afetando áreas mais extensas, pelo maior impacto sobre a estrutura geológica. São ainda atribuídos à exploração de minas e pedreiras, e às atividades nelas desenvolvidas, como mineração de superfície, bombeamento e inundações generalizadas, sismicidade, bem como, a injeção de fluidos a elevadas pressões.

Bibliografia

- Baecher, G. B., e Keeney, R.L. (1982). Statistical examination of reservoir- induced seismicity: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 72, no. 2, 553-569.
- Bell e Nur (1978). Strength changes due to reservoir induce pore pressure and stresses and application to lake Oroville, *J. Geophys. Res.* 83, 4469-4483.
- Bossu (1996). *Etude de la sismicité intra plaque de la région de Gazli (Ouzbékistan) et la localisation de la déformation sismique*, PhD Thesis, University Joseph Fourier, Grenoble.
- Câmara, R. (1992). *Comportamento sísmico do conjunto barragem-fundação-albufeira. Avaliação para cenários de ruptura*, Tese de Doutoramento em Engenharia, FEUP, Porto.
- Evans (1966). Man made earthquakes in Denver, *Geotimes* 10, 11-17.
- Gevin, P. (1979). La séismicité induite par les lacs réservoirs dans son contexte géologique dynamiquement considère. Paris (France), *Revue Française de Géotechnique*, n.º 7, 1-8.

- Gibowicz e Kijko (1994). *An Introduction to Mining Seismology*, Academic Press.
- Gibowicz, S. J., Droste, B., Guterch, J. H. (1981). The Belchatow, Poland, Earthquakes of 1979 and 1980 Induced by Surface Mining, *Engineering Geology*, 17, 257-271. Amsterdam.
- Grasso, J. R. e G. Wittinger (1990). Ten years of seismic monitoring over a gas field, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 80, 450-473.
- Gupta, H. K. e Rastogi, B. K. (1976). Dams and Earthquakes, *Elsevier*, Amsterdam, 229.
- Gupta (1985). The present status of reservoir induced seismicity investigations with special emphasis on Konya earthquake, *Tectonophysics* 118, 257-279.
- Healy, H., Rubey, W., Griggs, D., Raleigh, C. B. (1968). The Denver earthquakes, *Science*, Vo.. 161, 1301-1310.
- McDonald (1982). *Seismicity of the Witwatersrand Basin*, MSc Thesis, University of Witwatersrand, Johannesburg.
- McGarr e Simpson (1997). *Rockbursts and Seismicity in Mines*, Balkema, 385-396.
- McGarr (1991). On a possible connection between three major earthquakes in California and oil production, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 81, 948-970.
- McGarr, A., Simpson, D., Seeber, L. (2002). Case Histories of Induced and Triggered Seismicity, *International hand book of earthquake and engineering seismology*, Vol. 81A, 647-661.
- Nicholson e Wesson (1990). *Earthquake Hazard Associated with Deep Well Injection*, U.S. Geol. Surv. Bull. 1951, 74 p.
- Pennington, W. D., Davis, S. D., Carlson, S. M., Dupree, J., Ewing, T. E. (1986). The Evolution of Seismic Barriers and Asperities Caused by the Depressuring of Fault Planes in Oil and Gas Fields of South Texas, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 76, 939-948.
- Pomeroy, P., Simpson, D., Sbar, M. (1976). Earthquakes triggered by surface quarrying-the wappingers falls, New York sequence of June, 1974, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 66, 685-700.
- Ribotta, L. C. (1989). *Aspectos da sismicidade na área do reservatório de Paraibuna/Paraitinga*. Dissertação de Mestrado, IAG-USP
- Roeloffs (1988). Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level, *J. Geophys. Res.* 93, 2107-2124.
- Sbar e Sykes (1973). Contemporary compressive stress and seismicity in eastern North America: an example of intra-plate tectonics, *Geol. Soc. Am. Bull.* 84, 1861-1882.
- Seeber, L., Ekstrom, G., Jain, S. K., Murthy, C. V. R., Chandak, N., Ambruster, J. G. (1996). The Killari earthquake in central India: A new fault in Mesozoic basalt flows?, *Jour. Geophys. Res.*, 101, B4, 8543-8560.
- Simpson e Narasimhan (1990). In homogeneities in rock properties and their influence on reservoir induced seismicity, *Gerlands Beitr. Geophys.* 99, 205-220
- Simpson, D. W., Leith, S., Scholz, S. (1988). Two types of reservoir-induced seismicity, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 78, 2025-2040.
- Simpson, D. W., Gharib, A., Kebeasy, R. (1990). Induced seismicity and change in water level of Aswan reservoir, Egypt, *Gerlands Beitr. Geophys.* 99, 191-204.
- Wetmiller, R. J., Galley, C. A., Plouffe, M. (1993). *Post-closure seismicity at a hard-rock mine, Rockbursts and Seismicity in Mines* (R.P. Young, Ed.), Balkema, Rotterdam, 445-448.
- Yerkes e Castle (1976). Seismicity and faulting attributable to fluid extraction, *Eng. Geol.* 10, 151-167.
- Veludo, I., Matias, L., Costa, P. (2006). Monitorização sísmica do território do Parque Arqueológico do Vale do Côa (PAVC). *A arte da conservação técnicas e métodos de conservação em arte rupestre, III congresso de arqueologia, Trás-os-Montes, Alto Douro e Beira Interior*, 12-28.

(Página deixada propositadamente em branco)

CONCLUSÃO

Adélia Nunes

Departamento de Geografia e Turismo da Faculdade de Letras
CEGOT e RISCOS, Universidade de Coimbra, Portugal
ORCID: 0000-0003-3927-0748 adelia.nunes@ci.uc.pt

O contributo do ser humano, através das suas ações e atividades, constitui um elemento comum quando analisados os riscos mistos de componente ambiental, ampliando, de forma inequívoca, as suas causas e consequências. Acresce, por outro lado, os cenários futuros de mudanças climáticas, e a incerteza dos seus efeitos na amplificação dos riscos analisados.

Torna-se, por conseguinte, urgente e prioritário reduzir o risco através de esforços sistemáticos destinados a analisar e a gerir os fatores causadores deste tipo de catástrofes, assim como reconhecer a(s) vulnerabilidade(s), no intuito de proteger, de forma mais eficaz, as pessoas, as comunidades e os países, bem como os meios de subsistência, o património cultural e socioeconómico e os ecossistemas, incrementando, deste modo, a sua resiliência.

Assim, para alcançar tal desiderato, exige-se a implementação de medidas e ações integradas e o comprometimento de todos na salvaguarda dos recursos naturais. Neste contexto, emerge a necessidade de consciencialização da sociedade e das instituições sobre a complexidade destes fenómenos e das suas consequências, comprometedores do desenvolvimento social, económico, ambiental, cultural sustentável.

Torna-se, pois, necessário e urgente, neste contexto, integrar, na educação formal e na aprendizagem ao longo da vida, os conhecimentos, valores e habilidades necessárias para a redução do risco e para a promoção de modos de vida sustentáveis.

Embora os fatores de risco, aqui abordados, possam ser locais, nacionais, regionais ou globais, necessitam de ser compreendidos, para determinar as medidas de prevenção/redução a aplicar, requerendo novas formas de pensar e agir, mas também uma articulada cooperação e complementaridade entre os diferentes atores, nos planos local, nacional, regional e global, explorando as sinergias e interdependências entre as respetivas competências e estratégias. Na expectativa de que o presente livro sirva de inspiração a mais investigadores e decisores a participarem na

crescente avaliação e gestão dos riscos mistos, é também nosso desejo, através dos conteúdos aqui vertidos, facultar instrumentos metodológicos e pedagógicos que possam ser utilizados em atividades de investigação e educação, assim como promover competências pessoais, fundadoras de uma cidadania mais ativa, participada e informada, para uma prevenção e gestão mais eficaz dos riscos, e em simultâneo capazes de promover os valores e princípios da sustentabilidade.

Na expectativa de que o presente livro sirva de inspiração a mais investigadores e decisores a participarem na crescente avaliação e gestão dos riscos mistos, é também nosso desejo, através dos conteúdos aqui vertidos, facultar instrumentos metodológicos e pedagógicos que possam ser utilizados em atividades de investigação e educação, assim como promover competências pessoais, fundadoras de uma cidadania mais ativa, participada e informada, para uma prevenção e gestão mais eficaz dos riscos, e em simultâneo capazes de promover os valores e princípios da sustentabilidade.

SÉRIE
RISCOS E CATÁSTROFES

Títulos Publicados:

- 1 *Terramoto de Lisboa de 1755. O que aprendemos 260 anos depois?*
- 2 *Sociologia do Risco;*
- 3 *Geografia, paisagem e riscos;*
- 4 *Geografia, cultura e riscos;*
- 5 *Alcáçache. 30 anos depois;*
- 6 *Riscos e crises. Da teoria à plena manifestação;*
- 8 *Catástrofes antrópicas. Uma aproximação integral;*
- 9 *Catástrofes mistas. Uma perspectiva ambiental.*

Tomos em preparação:

- 7 *Catástrofes naturais. Uma abordagem global;*
- 10 *Riscos inerentes à rotura de barragens de acumulação de rejeitos de mineração;*
- 11 *Contributos da Ciência para a Redução do Risco;*
- 12 *Contributos da Educação para a Redução do Risco;*
- 13 *Contributos da Formação para a Redução do Risco.*

(Página deixada propositadamente em branco)

I
IMPRENSA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS
U

RISCOS
E CATASTROFES

1290



UNIVERSIDADE D
COIMBRA