



Monitorização com InSAR de encostas na vizinhança de uma albufeira durante o primeiro enchimento

Dora ROQUE^{1,*} e Ana Paula FALCÃO²

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa

² CERIS e Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa (IST-UL), Lisboa

(droque@lneec.pt; ana.p.falcao@tecnico.ulisboa.pt)

Palavras-chave: Monitorização, InSAR, análise de *clusters*, encostas

Resumo: O primeiro enchimento da albufeira é uma fase crítica para a segurança de uma barragem e das encostas vizinhas, uma vez que a acumulação de um grande volume de água e a sua interação com o maciço rochoso poderá alterar as propriedades deste e conduzir à ocorrência de deslizamentos de terra.

As barragens de betão são monitorizadas através de métodos geodésicos e de equipamentos instalados na estrutura, com incidência crescente em técnicas que permitem monitorização em tempo real, como estações totais robotizadas ou GNSS. Contudo, devido à sua extensão, as encostas na vizinhança da albufeira não são monitorizadas com frequência e, por vezes, são-no apenas em zonas onde já ocorreu algum acidente. Torna-se, portanto, difícil identificar sinais precusores de instabilidade nas encostas, que permitam tomar medidas preventivas de forma atempada.

Neste estudo, foi utilizada a interferometria radar de abertura sintética (InSAR) para monitorizar as encostas na vizinhança da albufeira de uma barragem durante os dois primeiros anos após o início do primeiro enchimento. Foi utilizado um conjunto de imagens do satélite Sentinel-1A, disponibilizadas através do programa Copernicus, adquiridas entre 2016 e 2018, a cada 12 dias, numa passagem descendente do satélite. O algoritmo utilizado para o processamento InSAR foi o *persistent scatterer interferometry* (PSI) implementado no programa SARPROZ[©]. Apesar das lacunas de pontos em zonas com vegetação ou de declive acentuado, foram obtidos milhares de pontos na área de estudo, com várias dezenas de épocas de observação ao longo dos dois anos da análise.

Os resultados obtidos através do processamento InSAR permitiram identificar pontos com deslocamento de magnitude de alguns centímetros. No entanto, há outras informações sobre a estabilidade da encosta que se podem obter a partir das séries temporais de deslocamento InSAR. Dado o grande volume de dados disponíveis, foi aplicado um método de análise de *clusters*, desenvolvido no LNEC, às séries temporais de deslocamento. O método utilizado permitiu agregar pontos em *clusters* de acordo com a semelhança entre as suas séries temporais. Esta estratégia diminuiu a dimensão da análise de vários milhares de pontos para poucas dezenas de *clusters*, o que facilitou a identificação de pontos com comportamentos distintos. A análise dos *clusters* obtidos mostrou que cerca de metade dos pontos observados apresentaram comportamento tendencialmente estável durante todo o intervalo de tempo considerado. Contudo, vários *clusters* continham pontos com movimento. Em alguns casos, *clusters* com movimento nos primeiros meses da análise acabaram por estabilizar, enquanto outros inicialmente estáveis passaram a apresentar movimento. Foram, ainda, identificados alguns *clusters* que apresentaram deslocamentos com tendência linear ao longo de todo o intervalo de tempo considerado.

Os resultados obtidos podem ser utilizados para constituir um alerta sobre a estabilidade da encosta. Especial atenção deverá ser dada aos pontos pertencentes a *clusters* que apresentavam deslocamentos com tendência linear ou que ainda tinham movimento no final do intervalo de tempo da análise. Os objetos que deram origem aos pontos em questão deverão ser identificados no campo e, caso se verifique que os deslocamentos medidos por InSAR estão relacionados com movimentos da encosta, estas zonas deverão ser monitorizadas através de outros métodos ainda mais precisos.



1. Introdução

A segurança de uma barragem não se refere apenas à estrutura, mas também à sua envolvente, nomeadamente a albufeira, as encostas na sua vizinhança e o vale a jusante. As alterações do volume de água numa albufeira são críticas para a segurança da barragem e respetiva envolvente, dado que interferem nas propriedades do maciço rochoso na sua vizinhança. A subida do nível de água da albufeira promove a infiltração de água no maciço rochoso, o que conduz à sua saturação e a uma menor resistência aos deslizamentos. Por outro lado, no caso de descida do nível de água, a diminuição mais rápida do nível da água da albufeira em relação à diminuição do nível freático também pode conduzir a situações de instabilidade da encosta (Fujita, 1977; Hui, 2015). Um eventual deslizamento que atinja a barragem poderá causar danos graves na estrutura, comprometendo a sua segurança. Mesmo que a barragem não seja atingida, o deslocamento repentino de uma massa de grandes dimensões para o interior da albufeira poderá causar a subida do nível de água e provocar inundações.

O primeiro enchimento de uma albufeira é a primeira vez que ocorre a subida do nível de água e a correspondente saturação do maciço rochoso. Trata-se, portanto, de uma fase crítica para a estabilidade das encostas, cujos deslocamentos devem ser monitorizados a fim de detetar eventuais indícios de movimento. As encostas na vizinhança de uma albufeira podem abranger áreas de vários quilómetros quadrados, não sendo, por isso, viável a sua monitorização através de métodos geodésicos *in situ*. A interferometria radar de abertura sintética (*interferometric synthetic aperture radar* – InSAR) poderá ser uma alternativa bastante interessante para esta aplicação, dada a sua capacidade para monitorização de grandes áreas, em pontos naturalmente existentes no terreno e com precisão milimétrica. Contudo, esta técnica também apresenta desvantagens na monitorização de encostas, nomeadamente lacunas na cobertura de pontos monitorizados em zonas com vegetação e em superfícies íngremes.

Neste estudo, foi efetuada a monitorização de deslocamentos nas encostas na vizinhança da albufeira da barragem de Foz Tua, durante os primeiros dois anos após o início do seu primeiro enchimento. Os deslocamentos foram determinados através de InSAR, tendo sido analisados através do método SARClust (Roque, 2020; Roque *et al.*, 2023), desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O método proposto agrupa os pontos de medição do InSAR de acordo com a semelhança das suas séries temporais de deslocamento em *clusters* de pontos com comportamento semelhante. Esta estratégia permite reduzir a dimensionalidade dos dados a analisar, o que facilita a identificação de padrões nos deslocamentos, que poderão corresponder a eventuais anomalias no comportamento das estruturas ou da sua envolvente.

Este artigo está organizado em cinco secções. Após a presente introdução, a segunda secção apresenta os principais passos do processamento InSAR e do método SARClust, enquanto a secção 3 descreve a área de estudo e a aplicação dos métodos explicados na secção anterior. A secção 4 apresenta os resultados obtidos e a sua discussão. As principais conclusões do estudo estão na secção 5.

2. Métodos

2.1 Processamento InSAR

A InSAR é um método de geodesia aplicada que utiliza imagens adquiridas por sensores radar transportados em satélites para a determinação de deslocamentos na superfície terrestre. As técnicas multitemporais de InSAR recorrem a pilhas de imagens, com a mesma geometria de aquisição, mas de épocas diferentes, para estimar valores de altitude com precisão métrica e deslocamentos com precisão milimétrica. São, também, obtidas séries temporais de deslocamentos, com precisão milimétrica e com uma observação para cada época de aquisição de imagem.

Neste estudo, os deslocamentos foram determinados através do algoritmo *persistent scatterer interferometry* (PSI) implementado no *software* SARPROZ© (Perissin *et al.*, 2011), que considera alvos pontuais, naturalmente existentes no terreno, correspondentes a pontos da superfície terrestre que mantiveram o seu comportamento refletor em relação aos sinais radar. Uma das imagens da pilha é selecionada como referência e as restantes imagens são corregistadas em relação a esta. O conjunto é georreferenciado através de um ponto de coordenadas conhecidas, o que permite alinhá-lo com um modelo digital de superfície (MDS) de referência. Um interferograma é uma imagem da diferença de fase do sinal radar entre duas épocas e contém contribuições do deslocamento na superfície terrestre, da altitude do terreno, de uma componente atmosférica e ruído. A componente relacionada com a altitude é estimada a partir do MDS e removida. A contribuição atmosférica é estimada para uma seleção de pontos de amplitude estável (força da reflexão do sinal na superfície terrestre) através da aplicação de filtros e interpolada para todos os píxeis da imagem, sendo depois removida. Um dos pontos de amplitude estável é selecionado para ponto de referência dos deslocamentos. A componente do deslocamento é estimada com base numa nova seleção de pontos (os candidatos a *persistent scatterers* – PSs). Para cada ponto candidato são estimados valores de deslocamento acumulado e uma correção à altitude do MDS. No caso da monitorização de encostas, não é exatável que os pontos apresentem uma velocidade constante, por isso foi considerado um modelo de deslocamentos não linear (Milillo *et al.*, 2016). Foi, também, obtida



uma série temporal de deslocamentos para cada ponto. Da seleção de pontos anteriores, foram considerados como PSs aqueles que apresentavam coerência temporal (uma medida da qualidade do ponto entre 0 e 1) superior a 0,8. A análise posterior foi efetuada apenas sobre os PSs.

2.2 Método SARClust

No caso da monitorização de estruturas e respetiva envolvente, em que são esperados deslocamentos com comportamento não linear, a análise das séries temporais de deslocamento é fundamental para identificar comportamentos anómalos. Uma monitorização com InSAR permite obter centenas ou milhares de pontos por quilómetro quadrado, em que cada um deles poderá ter associada uma série temporal de deslocamentos com dezenas ou centenas de épocas de observação. Dado o elevado volume de dados provenientes do InSAR, poderá ser difícil identificar sinais de possíveis anomalias nas séries temporais. Para facilitar essa análise, foi desenvolvido no LNEC o método SARClust, que permite identificar padrões nos deslocamentos através da construção de *clusters* de PSs com séries temporais de deslocamento semelhantes.

O método SARClust foi implementado num programa em R. Os únicos dados de entrada necessários para a aplicação do método são as séries temporais de deslocamento. Estas são alvo de um pré-processamento para mitigar eventuais movimentos do ponto de referência que possam estar a contaminar os deslocamentos dos restantes PSs e artefactos atmosféricos que não tenham sido removidos no processamento InSAR. Esta tarefa é baseada no método descrito em Notti *et al.* (2015).

De seguida é selecionado um número de *clusters* adequado à análise do caso de estudo. As séries temporais de deslocamentos são comparadas através de uma medida de distância entre séries temporais denominada *dynamic time warping* (Berndt e Clifford, 1994). Essas distâncias são utilizadas para construir uma matriz de dissimilaridade, que contém as distâncias entre as séries temporais de deslocamentos entre todos os pares de PSs e serve de base à aplicação do algoritmo de *clustering* hierárquico aglomerativo. No primeiro passo, este algoritmo considera que cada PS é um *cluster* individual e os *clusters* são iterativamente agregados de acordo com a menor dissimilaridade entre eles até que todos os PSs estejam contidos num único grupo. As distâncias que é necessário vencer nas várias iterações são analisadas de modo a apoiar a seleção do número de *clusters* a considerar. Se a distância entre dois *clusters* agregados numa determinada iteração for baixa, significa que os PSs pertencentes a esses dois *clusters* têm séries temporais de deslocamentos semelhantes. Por outro lado, se a distância for elevada, significa que os PSs que foram agregados têm séries temporais distintas e que, portanto, esses *clusters* já não deveriam ser juntos. Soluções correspondentes a *clusters* formados por elementos de características homogêneas correspondem a máximos locais de um gráfico das distâncias relativas entre *clusters* em função do número de grupos. Após a seleção do número de *clusters*, os PSs são distribuídos pelos vários grupos de acordo com as semelhanças entre as suas séries temporais.

Os resultados obtidos por este processo são de dois tipos: séries temporais de deslocamento representativas do comportamento de cada *cluster* e centroides de variáveis com interesse para a análise. As séries temporais de deslocamentos representativas do comportamento dos *clusters* correspondem à média das séries temporais de deslocamentos de todos os PSs pertencentes a cada *cluster*. Os centroides são determinados para dados variáveis no espaço, que podem ser introduzidos no programa sob a forma de imagem raster (por exemplo, uma imagem de declives). A cada PS é associado o valor dessa variável apresentado pelo píxel correspondente da imagem. O centroide é a média dos valores dessa variável para os PSs pertencentes a cada *cluster*. O programa seleciona um número de *clusters* a analisar de forma automática, mas o utilizador pode alterar esse número e analisar soluções correspondentes a diferentes números de *clusters*.

3. Aplicação ao caso de estudo

Os métodos propostos na secção 2 foram aplicados às encostas na vizinhança da albufeira da barragem de Foz Tua. Esta barragem é um arco de dupla curvatura, em betão, com altura de 108 m e com comprimento no coroamento de 275 m (LNEC, 2021). A estrutura está localizada nos concelhos de Carrazeda de Ansiães (distrito de Bragança) e Alijó (distrito de Vila Real). Em 2012, durante a construção da barragem, ocorreu um deslizamento de terras na encosta.

Para a análise foi considerada uma área de cerca de 30 km² na vizinhança da albufeira. O processamento InSAR apresentado na secção 2.1 foi aplicado sobre um conjunto de 59 imagens do satélite Sentinel-1A, adquiridas entre junho de 2016 e maio de 2018, a cada 12 dias, durante uma passagem descendente do satélite. O MDS utilizado como referência foi o EU-DEM, disponibilizado gratuitamente através do programa Copernicus.

Na aplicação do método SARClust, verificou-se que as soluções correspondentes a 21 e a 44 *clusters* seriam apropriadas para a análise do caso de estudo, dado que estas soluções correspondem a máximos locais do gráfico de distâncias relativas em função do número de *clusters* (Figura 1). As duas soluções foram avaliadas, tendo sido observado que a solução composta por 21 *clusters* apresentava *clusters* bastante homogêneos, não sendo necessário considerar um número superior de grupos. Por esta razão, os PSs foram organizados em 21 *clusters*.

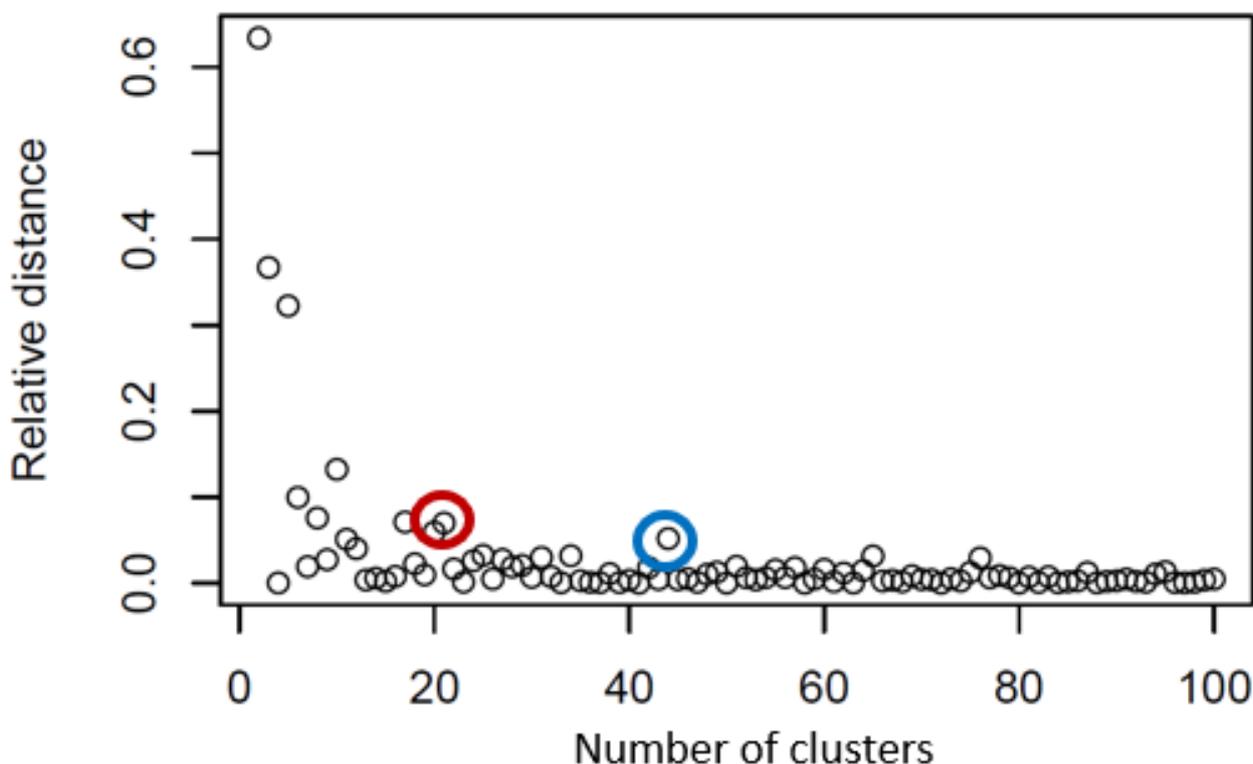


Figura 1 – Gráfico das distâncias relativas em função do número de *clusters*; máximos locais correspondentes a 21 (circunferência vermelha) e a 44 *clusters* (circunferência azul) assinalados

Para a determinação dos centroides, foram considerados vários tipos de dados variáveis no espaço, nomeadamente o declive do terreno, a sua curvatura e as distâncias à barragem, ao rio e a falhas geológicas. O declive e a curvatura do terreno foram determinados a partir do MDS utilizado no processamento InSAR, com recurso a *software* de sistemas de informação geográfica. As localizações da barragem e do rio foram digitalizadas manualmente a partir de ortofotos da Direção-Geral do Território acedidas através do Serviço Nacional de Informação Geográfica (SNIG) e as falhas foram obtidas a partir das cartas geológicas do Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Com base na informação vetorial recolhida, foram construídas imagens de distância a estes elementos no *software* ArcGIS®, onde a cada píxel foi associado o valor da distância euclidiana ao elemento vetorial mais próximo (Figura 2).

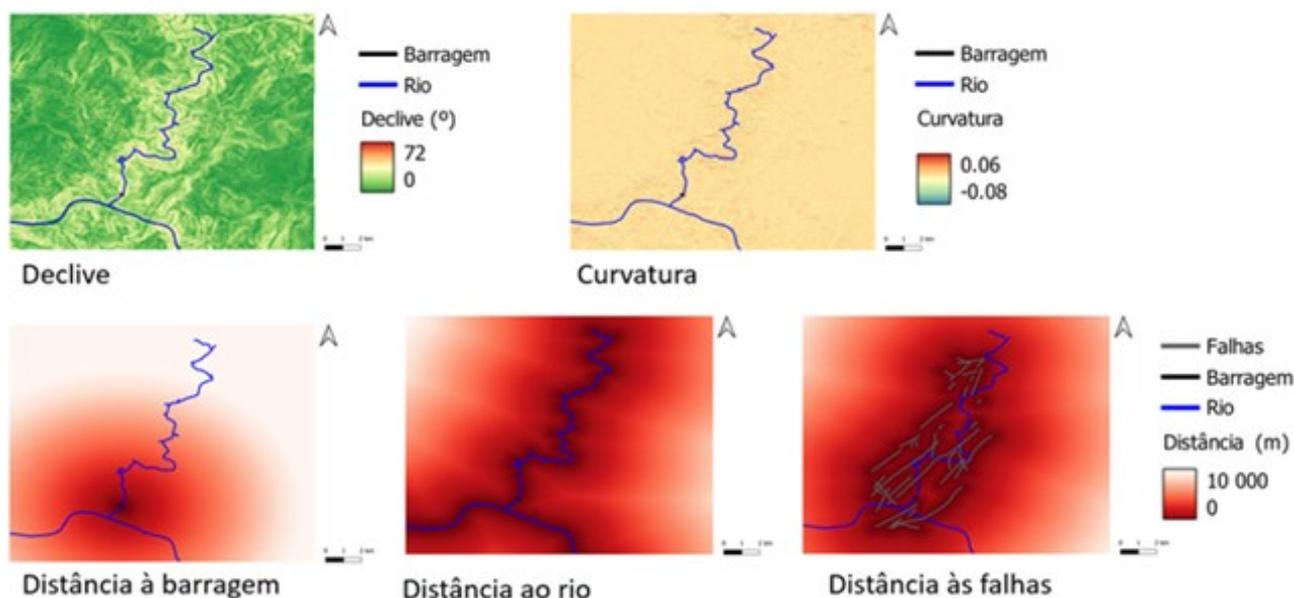


Figura 2 – Imagens com informação para a determinação dos centroides



4. Resultados e discussão

O processamento InSAR permitiu identificar cerca de 4000 PSs na área de estudo, distribuídos pelas encostas na vizinhança da albufeira. Como esperado, observaram-se algumas lacunas na cobertura de pontos, em zonas com vegetação ou com declive acentuado. Neste último caso, as lacunas foram mais evidentes nas encostas orientadas a oeste, situadas na zona de sombra do sinal emitido pelo sensor transportado pelo satélite. Os deslocamentos foram determinados ao longo de uma direção que faz um ângulo de $40,3^\circ$ com a vertical e um ângulo de $10,9^\circ$ com a direção este-oeste. Nos dois anos considerados, foram observados deslocamentos acumulados máximos de 81,6 mm no sentido de afastamento em relação ao sensor (valores negativos) e de 92,1 mm no sentido de aproximação ao sensor, com valores positivos (Figura 3).

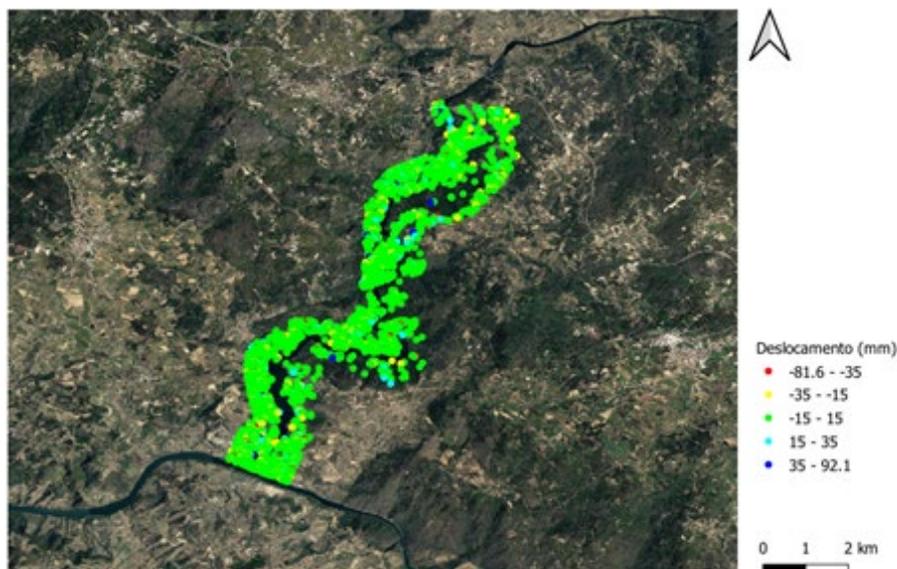


Figura 3 – Deslocamento acumulado nas encostas da albufeira de Foz Tua entre 2016 e 2018

O método SARClust permitiu identificar 21 tipos de comportamentos distintos na área de estudo. Verificou-se que o número de PSs em cada *cluster* era variável, havendo *clusters* com centenas de pontos e outros formados por um único elemento. As características das séries temporais de deslocamentos representativas do comportamento de cada *cluster* são apresentadas no Quadro 1, no que diz respeito ao sentido do movimento (se o *cluster* se aproximou ou afastou do sensor), à magnitude do deslocamento acumulado ao longo dos dois anos da análise (milimétrica ou centimétrica) e à tendência dos deslocamentos nos últimos meses do intervalo de tempo considerado (se estes apresentaram uma velocidade constante, ou se, por outro lado, mostraram sinais de aceleração ou desaceleração). Observou-se que o *cluster 2*, que contém 66% dos PSs, apresentou um comportamento tendencialmente estável ao longo dos dois anos analisados, com deslocamentos de pequena magnitude de aproximação ao sensor. Também o *cluster 5* mostrou deslocamentos de magnitude milimétrica. Os restantes *clusters* deslocaram-se alguns centímetros durante os dois anos considerados, apresentando padrões diferentes de comportamento. Dos PSs com deslocamentos centimétricos, 46% afastaram-se do sensor e os restantes 54% aproximaram-se. O afastamento ao sensor poderá corresponder a assentamentos ou a deslocamento horizontal de este para oeste, enquanto a aproximação ao sensor poderá estar associada a empolamento ou deslocamento horizontal de oeste para este. As duas situações poderão estar relacionadas com eventual instabilidade na encosta. Quanto à tendência de deslocamento no final do intervalo de tempo da análise, 16% dos PSs com deslocamento centimétrico apresentaram velocidade constante, o que no caso de a velocidade ser diferente de 0 poderá constituir um indício de suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos. Este comportamento foi observado para os *clusters* 13, 14 e 17. Observou-se que 64% dos PSs com deslocamentos centimétricos sofreram uma desaceleração, o que sugere uma diminuição da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos para estes pontos, mas que 19% dos pontos apresentaram uma aceleração, com o efeito oposto.

A localização dos PSs pertencentes a cada *cluster* mostrou que os grupos estavam distribuídos na área de estudo. Foi identificado um agregado espacial de pontos do *cluster 5* localizado na margem direita a montante da barragem (Figura 4). Este *cluster* afastou-se do sensor alguns milímetros durante os primeiros meses do enchimento da albufeira, tendo depois estabilizado.



Quadro 1 – Caracterização dos deslocamentos de cada *cluster*; o símbolo “X” significa que o *cluster* apresenta determinada característica

Cluster	Sentido do movimento		Magnitude		Tendência		
	Afastamento	Aproximação	Milimétrica	Centimétrica	Velocidade constante	Aceleração	Desaceleração
1	X			X	X		
2		X	X		X		
3		X		X			X
4	X			X		X	
5	X		X				X
6		X		X			X
7	X			X		X	
8		X		X		X	
9		X		X			X
10		X		X		X	
11	X			X			X
12	X			X			X
13	X			X	X		
14	X			X	X		
15	X			X			X
16	X			X			X
17		X		X	X		
18		X		X			X
19		X		X	X		
20	X			X		X	
21		X		X			X

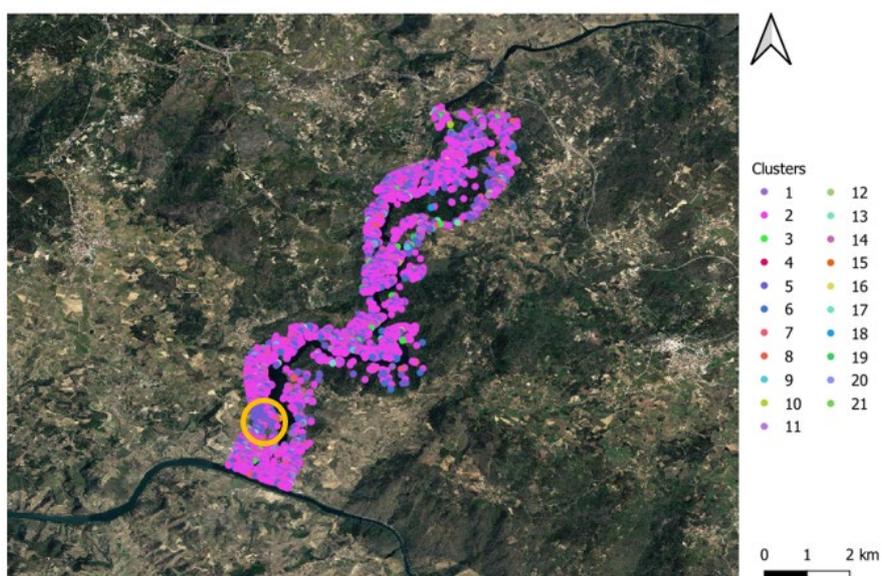


Figura 4 – Distribuição espacial dos *clusters* na área de estudo; a circunferência amarela assinala um aglomerado espacial de PSs do *cluster* 5

Os centroides das variáveis de interesse permitiram caracterizar a localização dos *clusters* e são apresentados no Quadro 2.



Quadro 2 – Centroides das variáveis de interesse para cada *cluster*

<i>Cluster</i>	Declive (°)	Curvatura (m ⁻¹)	Distância à barragem (m)	Distância ao rio (m)	Distância às falhas (m)
1	20	-0,0007	4171	394	426
2	22	0,0004	4503	353	342
3	22	0,0003	6013	312	352
4	12	0,0104	4829	303	132
5	21	0,0007	4583	436	413
6	23	-0,0010	4968	376	323
7	20	-0,0006	4182	405	393
8	22	0,0023	4511	434	423
9	20	-0,0019	4866	422	408
10	24	-0,0070	6050	323	264
11	21	0,0014	4450	455	447
12	24	0,0047	3976	495	559
13	20	-0,0016	4008	419	363
14	18	-0,0058	3879	462	510
15	18	-0,0173	5115	543	1032
16	21	-0,0018	4172	439	393
17	21	0,0015	6104	361	252
18	21	0,0209	8489	313	148
19	24	0,0024	3473	372	331
20	15	-0,0056	3770	228	170
21	15	-0,0015	270	309	573

De acordo com Rosi *et al.* (2018), os deslizamentos de terra têm tendência a ocorrer para declives iguais ou superiores a 15°, o que foi observado para quase todos os *clusters* analisados. A mesma fonte refere que os movimentos tendem a estar localizados em zonas ligeiramente côncavas, a que correspondem valores positivos de curvatura. Destacaram-se neste fator os *clusters* 4 e 18. Na distância à barragem, o *cluster* 21 era o mais próximo da estrutura. Verificou-se que este estava localizado numa superfície convexa e suficientemente afastado da barragem para não constituir uma ameaça à segurança da estrutura. Observou-se, também, que os seus deslocamentos apresentavam uma tendência de desaceleração. Na distância ao rio, destacou-se o *cluster* 20, composto por dois PSs localizados em taludes orientados para a albufeira. Estes pontos apresentaram deslocamentos tendencialmente estáveis durante o primeiro ano da análise e afastaram-se cerca de 60 mm do sensor no ano seguinte, não tendo havido sinais de desaceleração. Um dos PSs estava localizado numa zona com declive de 21° e curvatura positiva. A conjugação de todos estes fatores indica que a localização do ponto em questão deveria ser inspecionada, a fim de averiguar o elemento da paisagem que estava a ser detetado como PS e se os seus deslocamentos poderiam estar associados a movimentos na encosta. Os *clusters* com maior proximidade às falhas foram os 4, 18 e 20. No entanto, observou-se que os PSs pertencentes a cada um deles estavam localizados próximos de falhas diferentes ou em lados opostos destas, o que sugere que os deslocamentos observados não estavam relacionados com estes elementos. Dos *clusters* que apresentaram séries temporais com movimento nos últimos meses da análise, os *clusters* 8 e 17 estavam localizados em zonas com características compatíveis com a ocorrência de deslizamentos de terra, de acordo com a análise dos centroides.

5. Conclusões

Neste estudo, a tecnologia InSAR, aliada ao método SARClust desenvolvido no LNEC, foi utilizada para monitorizar deslocamentos nas encostas da albufeira da barragem de Foz Tua, durante os primeiros dois anos após o início do primeiro enchimento. Apesar das condições adversas da paisagem para a monitorização com InSAR, nomeadamente a presença de



vegetação e os declives acentuados, foi obtida uma cobertura de pontos satisfatória. O algoritmo PSI combinado com um modelo de deslocamentos não linear implementado no *software* SARPROZ® permitiu registar a evolução dos deslocamentos dos PSs localizados nas encostas. A análise das séries temporais de deslocamento beneficiou da aplicação do método SARClust, que agregou os PSs em *clusters* de comportamento semelhante. Isto permitiu diminuir a dimensionalidade dos dados e facilitou a identificação de anomalias nos deslocamentos. A caracterização dos *clusters* de PSs através de imagens de dados variáveis no espaço possibilitou uma avaliação mais informada da suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos de terra na área de estudo.

A aplicação dos métodos propostos detetou algumas situações merecedoras de atenção, nomeadamente PSs pertencentes a *clusters* que ainda apresentavam movimento no final do intervalo de tempo considerado no estudo, localizados em zonas de declive acentuado e superfícies côncavas. Refere-se, contudo, que os elementos da paisagem que se comportam como PSs correspondem, por vezes, a objetos cujos deslocamentos podem não ser solidários com os da encosta (por exemplo, vedações ou postes). É, portanto, necessário realizar inspeções às localizações dos PSs identificados para averiguar a sua natureza e, caso se verifique que os deslocamentos observados por InSAR podem estar associados à encosta, deverão ser efetuadas monitorizações com métodos *in situ*.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao Professor Daniele Perissin a autorização para utilização do *software* SARPROZ® e o apoio prestado no processamento InSAR, à Agência Espacial Europeia o acesso às imagens Sentinel-1, à Direção-Geral do Território o acesso a ortofotos através do Sistema Nacional de Informação Geográfica e ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia o acesso às cartas geológicas.

Referências Bibliográficas

- Berndt, D.; Clifford, J. (1994). Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series. Workshop on Knowledge Discovery in Databases; KDD Workshop: Seattle, WA, USA; Vol. 10, Págs. 359–370.
- Fujita, H. (1977) Influence of water level fluctuations in a reservoir on slope stability. Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, Vol. 16, No. 1, Págs. 170–173. doi: 10.1007/bf02591474.
- Hui, L. (2015) Yangtze riverbank slope stability by water level change in the Three Gorges reservoir. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 20, Págs. 1847–1856.
- LNEC (2021). Barragem de Foz Tua. Inspeção à estrutura e ao sistema de observação efetuada em novembro de 2020. Nota Técnica LNEC 27/2021 – DBB/NO.
- Milillo, P.; Perissin, D.; Salzer, J. T.; Lundgren, P.; Lacava, G.; Milillo, G.; Serio, C. (2016). Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 52, Págs. 221–229. doi: 10.1016/J.JAG.2016.06.013.
- Notti, D.; Calò, F.; Cigna, F.; Manunta, M.; Herrera, G.; Berti, M.; Meisina, C.; Tapete, D.; Zucca, F. (2015). A user-oriented methodology for DInSAR time series analysis and interpretation: Landslides and subsidence case studies. Pure and Applied Geophysics, Vol. 172, No. 11, Págs. 3081–3105. doi: 10.1007/s00024-015-1071-4.
- Perissin, D.; Wang, Z.; Wang, T. (2011) The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence / manmade structure stability monitoring in China. 34th International Symposium for Remote Sensing of the Environment. Sydney, Australia, April 10-15, pp. 4.
- Roque, D. (2020). Displacement measurement through InSAR geodesy for structural health monitoring. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Roque, D.; Falcão, A.P.; Perissin, D.; Amado, C.; Lemos, J.V.; Fonseca, A. (2023). SARClust—A New Tool to Analyze InSAR Displacement Time Series for Structure Monitoring. Sustainability, Vol. 15, No. 4, Pág. 3728. <https://doi.org/10.3390/su15043728>.
- Rosi, A.; Tofani, V.; Tanteri, L.; Tacconi Stefanelli, C.; Agostini, A.; Catani, F.; Casagli, N. (2018). The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution. Landslides, Vol. 15, No. 1, Págs. 5–19. doi: 10.1007/s10346-017-0861-4.