

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Proyecto RISKCOAST

Desarrollo de herramientas para prevenir y gestionar los riesgos geológicos en la costa ligados al Cambio Climático



Autor Principal: Roberto Sarro (Instituto Geológico y Minero de España)

Otros autores: Rosa María Mateos (Instituto Geológico y Minero de España); Cristina Reyes-Carmona (Instituto Geológico y Minero de España); Mónica Martínez-Corbella (Instituto Geológico y Minero de España); Eduardo Peña (Instituto Geológico y Minero de España); Juan Antonio Luque (Instituto Geológico y Minero de España); Jorge Pedro Galve (Universidad de Granada), José Miguel Azañón (Universidad de Granada); Agustín Millares (Universidad de Granada); Marina Cantalejo (Universidad de Granada); Manuel Cobos-Budía (Universidad de Granada); Asunción Baquerizo-Azofra (Universidad de Granada); Juan Martín (ASITEC Ingeniería, Urbanismo y Medio Ambiente S.L.); Pedro Martín (ASITEC Ingeniería, Urbanismo y Medio Ambiente S.L.); Anna Barra (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya); Oriol Monserrat (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya).



INDICE

RESUMEN	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Eventos costeros extremos	3
1.2. Peligros geológicos en la planificación territorial y ordenación urbanística.....	5
2. ZONAS DE ESTUDIO.....	6
3. PRIMEROS RESULTADOS	8
3.1. Cartografías de riesgo para la planificación urbanística y territorial	8
3.2. Herramientas basadas en el estudio integrado de la dinámica fluvial y costera....	10
3.3. Herramientas de apoyo a sistemas de alerta temprana	12
4. PUESTA EN PRACTICA DE LAS HERRAMIENTAS: SIMULACRO DE EMERGENCIA.....	14
5. MEDIDAS DE REHABILITACIÓN Y PREVENTIVAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO ..	15
AGRADECIMIENTOS.....	16
BIBLIOGRAFIA.....	17

RESUMEN

El incremento de los eventos de precipitaciones extremas y los largos periodos de sequía debidos al cambio climático inducen a peligros geológicos que afectan notablemente a la economía de las regiones y representan una amenaza a sus habitantes. La costa es un territorio especialmente vulnerable, ya que ha sido ampliamente modificada por la presión urbanística relacionada con un modelo de turismo masivo. El proyecto **RISKCOAST “Desarrollo de Herramientas para prevenir y gestionar los riesgos geológicos en la costa ligados al Cambio Climático” es un proyecto europeo Interreg de la IV convocatoria SUDOE** que busca promover la innovación para hacer frente a un abanico de peligros geológicos que amenazan la costa: desprendimientos rocosos, deslizamientos, erosión y pérdida de suelo tras eventos torrenciales, erosión de costas arenosas y regresión de deltas, así como otros efectos relacionados con la disminución de recursos hídricos durante los periodos de sequías extremas. Los procesos costeros suelen ser muy complejos y conllevan efectos en cascada difíciles de predecir. En general, los trabajos técnicos/científicos relacionados con los riesgos costeros se limitan al ámbito litoral y no integran al conjunto de la cuenca hidrológica. Esto es un error, ya que los procesos que finalmente tienen lugar en la costa se han gestado en otras partes del territorio.

RISKCOAST establecerá una red de cooperación transnacional en materia de gestión de riesgos geológicos en la costa facilitando herramientas innovadoras, metodologías y soluciones para hacer frente común a los retos identificados. Los productos generados darán apoyo a las tres fases de la gestión de emergencias: prevención, respuesta y rehabilitación. Los nuevos instrumentos estarán basados en técnicas satelitales y aerotransportadas, modelización numérica avanzada, experimentación en laboratorio y simulaciones matemáticas que generarán productos aplicables a una gestión eficaz de los riesgos.

Además, RISKCOAST propondrá una serie de medidas adaptadas de rehabilitación de zonas siniestradas de carácter natural, en detrimento de las grandes obras de cemento. Las medidas no serán aisladas, sino que tendrán en cuenta el funcionamiento del conjunto de la cuenca hidrológica.

Finalmente, RISKCOAST promoverá la creación de una plataforma de participación que mejore la comunicación entre los diferentes sectores sociales implicados en la gestión del litoral y la comunidad científica.

El consorcio del proyecto RISKCOAST está formado por grupos de trabajo de España, Francia y Portugal y está liderado por el Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC). De España participan además el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), la Universidad de Granada (UGR), y la PYME, ASITEC Ingeniería, Urbanismo y Medio Ambiente S.L. Por parte de Francia están el Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) y el Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Por último, Portugal está representado por el Instituto de Geografia e Ordenamento do Território de la Universidade de Lisboa (IGOT).

1. INTRODUCCIÓN

La costa es muy vulnerable al cambio climático, con impactos asociados a la inundación permanente de zonas bajas y a eventos extremos que disparan la erosión y la ocurrencia de inestabilidades de laderas, como los desprendimientos de rocas. Los escenarios futuros, según Modelos de Circulación Global (MCG), apuntan hacia un incremento de la frecuencia y severidad de eventos extremos. Las alteraciones en la dinámica fluvial con los escenarios MCG se han abordado en trabajos previos, así como simulaciones de cambios en la morfología costera.

Sin embargo, el impacto del cambio climático en la concatenación de procesos erosivos y de transporte de agua/sedimento, desde las zonas altas de la red fluvial, su interacción con las infraestructuras existentes, y su repercusión final en la zona costera, no se ha analizado con suficiente profundidad hasta el momento. El proyecto RISKCOAST ofrece esta visión integral de la cuenca [1].

Por otra parte, los peligros geológicos cuentan con mucha literatura científica, especialmente trabajos que desarrollan metodologías para afrontar estudios de susceptibilidad, peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo [2–5]. No obstante, aún son escasos los trabajos que introducen un análisis integral de los riesgos costeros según los escenarios climáticos previstos. También se ha avanzado mucho en el desarrollo de nuevas herramientas para el apoyo a sistemas de alerta temprana, basadas en técnicas de teledetección, modelos de simulación y herramientas matemáticas. RISKCOAST adaptará las diferentes herramientas a las peculiaridades del territorio costero y a una gestión más integral de los riesgos.

1.1. Eventos costeros extremos

La primera de las actividades desarrolladas en el proyecto RISKCOAST ha sido analizar la ocurrencia de eventos costeros significativos en los últimos 10 años en el territorio SUDOE. Como «significativo» ha de entenderse eventos con víctimas mortales y/o daños con importantes repercusiones económicas en la zona, y que hayan sido ampliamente cubiertas por los medios de comunicación. Para realizar este inventario, en el marco del proyecto, se ha elaborado una ficha detallada para cada evento, indicando todas las características del mismo: localización, factores desencadenantes, procesos generados, efectos causados, daños económicos, activación de planes de emergencias, así como las medidas adoptadas, las repercusiones mediáticas y los efectos en la población. Se analizan también las causas meteorológicas que los generaron, con datos cuantificados de lluvia, viento, oleaje, etc., así como la duración del evento y su extensión territorial. En el caso de desencadenamiento de procesos en cascada se recoge una descripción detallada de los mismos y su sucesión a lo largo del tiempo. En cuanto al origen de la información, se ha obtenido por medio de: bases de datos propias, artículos científicos, informes técnicos y, muy especialmente, datos recopilados de los medios de comunicación.

En la costa SUDOE de España se han recopilado 74 eventos significativos durante los últimos 10 años. Los eventos se han agrupado en tres grandes secciones de la costa española: la costa Cantábrica y Galicia, la costa Atlántica, la franja mediterránea de Andalucía, con Ceuta y Melilla, y la costa mediterránea española, desde la Región de Murcia a Cataluña, e incluyendo a las Islas Baleares. En relación a la distribución de eventos por tramos de costa (Figura 1), el litoral más afectado es la costa Cantábrica y Galicia (30 eventos), seguido de la costa levantina

mediterránea (24 eventos) y la costa Andaluza, Ceuta y Melilla (20 eventos). En cuanto a la distribución temporal de los eventos, destacan los años 2018 y 2019 con 9 eventos cada año, y los años 2014 y 2015 con 7 y 6 eventos respectivamente. Para el año 2020 únicamente se han contabilizado los meses de enero y febrero, con 3 eventos en ese primer bimestre. Pero en general se puede afirmar que se observa una tendencia creciente en el número de eventos dañinos.

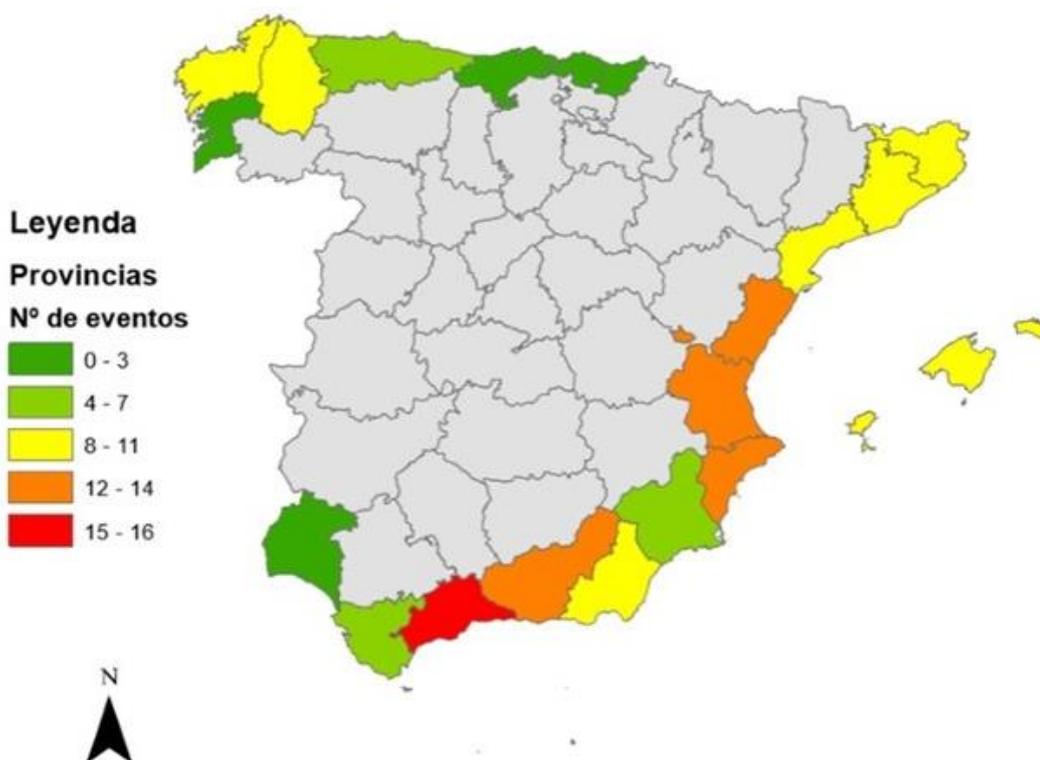


Figura 1. Distribución, por tramos de costa, de los eventos costeros dañinos de la última década en España.

En total, los 74 eventos extremos recogidos en el inventario causaron 111 muertos y 44 heridos. Destaca el evento acontecido en otoño del año 2012 en todo el arco mediterráneo: Andalucía, Murcia y Comunidad Valenciana, que causó 25 víctimas mortales. En cuanto a las pérdidas económicas se alcanzaron un total de 827,9 Millones de €, distribuyéndose principalmente en la costa de Andalucía, Ceuta y Melilla con unos 500 millones de euros de pérdidas, seguida de la costa levantina mediterránea con 312,2 millones de euros.

Analizando los datos en conjunto, a pesar de ser la costa Cantábrica y Galicia la más afectada, en número de vientos (30), es la región con menor número de víctimas mortales (9) y pérdidas económicas (14,7 millones de euros). Ello se debe a que la costa Norte-Atlántica española está mucho más preparada para los procesos dañinos costeros, ya que ha venido invirtiendo mucho dinero y esfuerzos en la prevención y la mitigación del riesgo.

1.2. Peligros geológicos en la planificación territorial y ordenación urbanística

En España, tanto la planificación territorial como la Protección Civil está en manos de las Comunidades Autónomas y de su administración, mientras que la planificación urbanística recae sobre los ayuntamientos. Los ayuntamientos son los responsables de elaborar el Plan General de Ordenación Urbana de su municipio (PGOU), aunque su aprobación definitiva es responsabilidad de la Comunidad Autónoma correspondiente.

Los peligros geológicos están contemplados en la legislación española en dos ámbitos bien diferenciados [6]: (i) La Ley del Suelo y de Rehabilitación urbana, aprobada por Real Decreto 7/2015 del 30 de octubre, y (ii) la Norma Básica de Protección Civil, aprobada por Real Decreto 407/1992, del 24 de abril, esta ley se orienta al estudio y prevención de las situaciones de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública y a la protección y socorro de personas y bienes en los casos en que dichas situaciones se produzcan.

En relación a la primera, por primera vez, la ley exige la elaboración de mapas de riesgos naturales para su inclusión en la planificación urbana. En base a esta legislación, los mapas de riesgos naturales deben incluirse en el informe de sostenibilidad ambiental del territorio objeto de planificación, informe que será finalmente aprobado o no por los órganos de las Comunidades Autónomas. Sin embargo, si se analiza la cartografía se observa que la mayoría de los mapas que se presentan son de susceptibilidad, en ningún caso de riesgo, y principalmente para inundaciones (regulado por la Directiva Europea). La realidad es que hay una enorme heterogeneidad en el tipo de mapas, contenidos, escalas y metodologías, así como una gran confusión de conceptos, tales como: susceptibilidad, peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo.

La Norma Básica de Protección Civil se orienta al estudio y prevención de las situaciones de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública y a la protección y socorro de personas y bienes en los casos en que dichas situaciones se produzcan. La Norma Básica establece la obligatoriedad, para cada Comunidad Autónoma, de elaborar los Planes de Emergencia Territorial, que constituyen la base organizativa y administrativa para gestionar las emergencias. Adicionalmente, la Norma establece la posibilidad de elaborar Planes Especiales para los peligros naturales más significativos en la región. Estos Planes Especiales no solo incluyen la estructura operativa para hacer frente al peligro, sino también un profundo conocimiento y caracterización del peligro natural, basado generalmente en el conocimiento científico. En este sentido, para el desarrollo de los Planes Especiales hay una estrecha colaboración entre la comunidad científica y los servicios de Protección Civil [7,8].

Por tanto, según lo expuesto anteriormente se evidencia que la gestión de los riesgos costeros, implican a un amplio abanico de instituciones, de ámbito local, regional y nacional [9]. Es por ello que cuando sucede una catástrofe de envergadura, la gestión de la misma es una tarea difícil de coordinar de manera eficaz, abordando los problemas cuando se producen, y sin diseñar previamente una política de prevención y predicción. RISKCOAST promoverá la cooperación entre todas las entidades públicas competentes, impulsará el conocimiento mutuo, y pondrá a disposición de las instituciones de gestión de una serie de herramientas para el diseño de sistemas de alerta temprana, así como de apoyo a los planes de prevención de riesgos, planes de emergencia y protocolos de actuación. Con este proyecto se pretenden diseñar estrategias que sean los pilares de futuras colaboraciones y actuaciones.

2. ZONAS DE ESTUDIO

Las zonas de estudio en el territorio español del proyecto RISKCOAST serán principalmente 2: la provincia de Granada (Andalucía) y Mallorca e Ibiza (Islas Baleares). En Granada, los estudios del proyecto se han centrado principalmente en movimientos del terreno (deslizamientos y desprendimientos principalmente) y avenidas torrenciales, mientras que en el caso de las islas Baleares, los trabajos se han focalizado en los desprendimientos rocosos.

La isla de Mallorca será una zona de trabajo clave para el proyecto RISKCOAST, ya que -en un territorio pequeño- se concentran todos los riesgos. El impacto turístico y urbanístico sobre la costa mallorquina es de los mayores de Europa. Para los estudios del proyecto RISKCOAST, una de las zonas más interesantes es la Serra de Tramuntana (Figura 2). Esta formación, es una alineación montañosa paralela a la costa noroccidental de la isla. Presenta una línea de cumbres con altitudes superiores a 600 m, una anchura media de unos 15 km, y una longitud máxima de 90 km. La parte más elevada de la cordillera es el sector central, donde se encuentran los picos más elevados de la Serra (Puig Major, 1445 m, Puig Massanella, 1348 m).

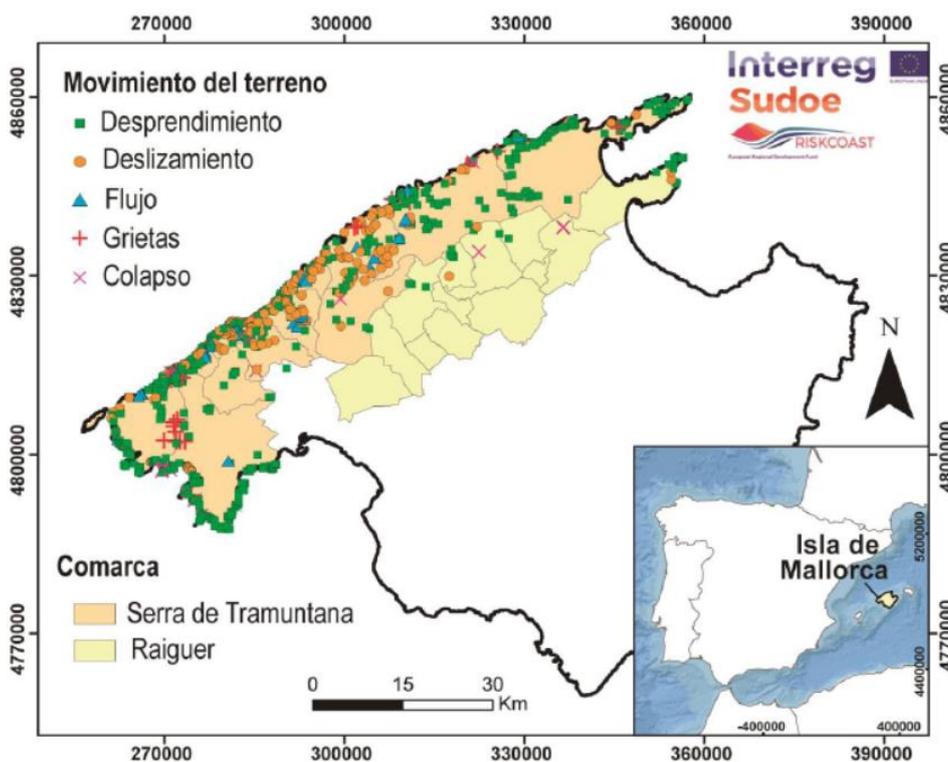


Figura 2. Mapa RISKCOAST de movimientos del terreno de la Serra de Tramuntana. Se indican las diferentes tipologías de movimientos.

En la Serra de Tramuntana, se ha realizado un inventario de movimientos de ladera, recopilándose un total de 965 registros clasificados según su tipología: desprendimientos, deslizamientos, flujos, colapsos kársticos y zonas agrietadas relacionadas con procesos de expansión lateral (Figura 2). De ellos destacan los desprendimientos rocosos, que comprenden el 67% de los registros, seguido de por los deslizamientos que suponen un 24%.

La provincia de Granada es muy montañosa y con una compleja geología resultado de la orogenia Alpina. Estas características determinan una gran proliferación y recurrencia de los movimientos de ladera de todas las tipologías posibles. Estos principalmente se distribuyen en Sierra Nevada y su contorno, donde se pueden encontrar las mayores elevaciones de la Península Ibérica (Mulhacén 3,482 m). En el caso de Granada, se ha seleccionado toda la provincia como zona de estudio para el proyecto RISKCOAST.

Al igual que en el caso de la Serra de Tramuntana, se ha llevado a cabo un inventario de los movimientos del terreno. La información obtenida se desglosa en dos tipos:

- Información de polígonos. Movimientos del terreno cuya masa deslizada ha sido cartografiada y delimitada espacialmente. Se han documentado un total de 736 movimientos del terreno de los cuales 39 son desprendimientos (5%), 364 son deslizamientos (50%) y 333 son flujos (45%) (Figura 3-a).
- Información de puntos. Movimientos del terreno cuya extensión no ha sido delimitada, pero se conoce la existencia de inestabilidad y/o se han documentado eventos en la zona en cuestión. Se han documentado un total de 5646 movimientos del terreno de los cuales 1034 son desprendimientos (19%), 1759 son deslizamientos (31%) y 2849 son flujos (50%) (Figura 3-b).

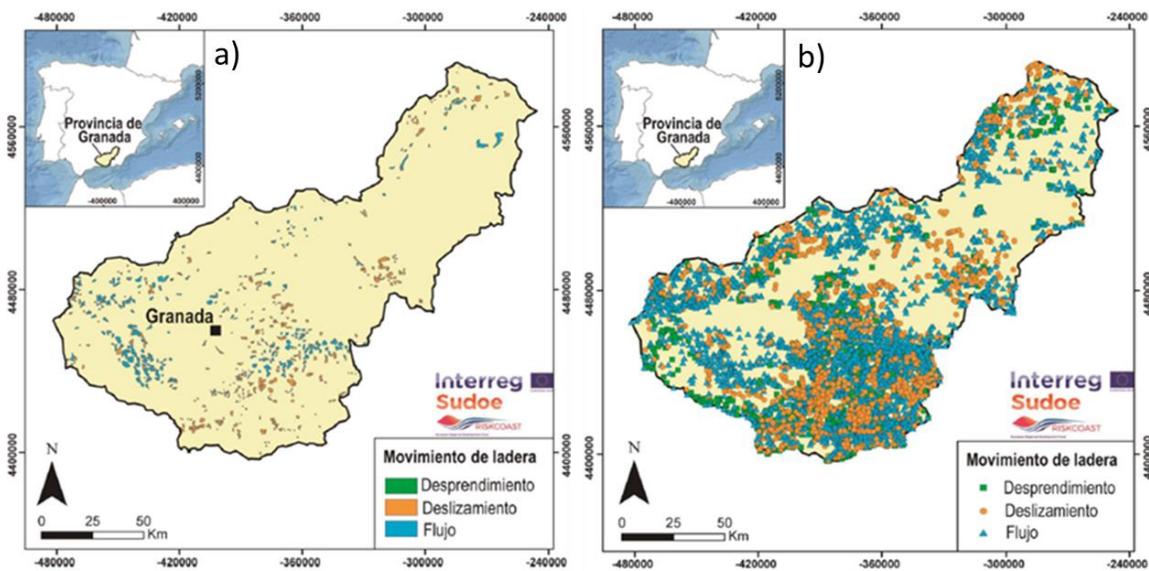


Figura 3. Mapa de movimientos de ladera en la provincia de Granada realizado a partir de la información de la base de datos BD-MOVES. a) polígonos y b) puntos [10].

3. PRIMEROS RESULTADOS

El cambio climático es un fenómeno global, tanto por sus causas como por sus efectos, y requiere de una respuesta basada en la cooperación internacional. Las lecciones aprendidas obligan a alinear las estrategias y las políticas de gestión de los riesgos en un contexto transnacional. Ha llegado el momento de aprender juntos cómo hacer frente a las amenazas y establecer líneas de actuación comunes, más allá de compartir solo información y experiencias. El objetivo de RISKCOAST es desarrollar e implementar una serie de herramientas innovadoras que ayuden a prevenir y gestionar los riesgos de una manera más eficaz; productos para el diseño de sistemas de alerta temprana, planes de prevención de riesgos, de emergencia y protocolos de actuación, aplicables y adaptables a cualquier región costera del espacio SUDOE y exportables a otros países y regiones.

Los beneficiarios de RISKCOAST serán las instituciones locales, regionales y nacionales implicadas en la gestión del riesgo: Servicios de Emergencias y Protección Civil, así como administraciones con competencias en la ordenación del territorio y la planificación urbanística. RISKCOAST quiere trabajar para fortalecer sus capacidades en la evaluación del riesgo con el desarrollo de metodologías comunes, pero versátiles para adaptarse a las singularidades de cada territorio. Los ciudadanos serán los beneficiarios finales con un incremento de su seguridad frente a las amenazas y una mejora de la resiliencia.

3.1. Cartografías de riesgo para la planificación urbanística y territorial

El primero de los resultados que se pretende lograr con el proyecto RISKCOAST es un conjunto de cartografías que sean de utilidad para las etapas de prevención y gestión de catástrofes. La inclusión de los peligros geológicos en la planificación urbanística y territorial es de vital importancia para evitar, a toda costa, el urbanismo y el desarrollo de infraestructuras en zonas de riesgo. La realización de cartografías específicas con este fin es clave para una planificación adecuada. Homogeneizar contenidos, escalas, leyendas, etc. de los mapas de vulnerabilidad, riesgo y elementos expuestos es una tarea que aborda RISKCOAST con el objetivo de crear unas herramientas cartográficas útiles, en un lenguaje comprensible para los gestores y donde todos los elementos del territorio estén contemplados.

Partiendo de la base de los inventarios mostrados sobre la descripción de las zonas de estudio, se identificarán los riesgos (principalmente movimientos de ladera y avenidas) más relevantes. Posteriormente, se han elaborado mapas de susceptibilidad utilizando métodos estadísticos y/o de base determinista. Para realizar este análisis, el conocimiento de los factores condicionantes es fundamental. Por ejemplo, para el caso de los movimientos del terreno, Los factores condicionantes son aquellos que describen las características físicas y/o ambientales que influyen en la estabilidad de las laderas. Entre los factores condicionantes más significativos están: el ángulo de inclinación o pendiente de la ladera, la litología, el grado de alteración superficial de los materiales, su contenido en agua, la curvatura y orientación de la ladera, la cobertera vegetal del suelo, etc. [11]

Para llevar a cabo el estudio de la susceptibilidad los deslizamientos en la provincia de Granada, se ha utilizado el software libre LAND-SE (LANDslide Susceptibility Evaluation) desarrollado por

Rossi y Reichenbach [12]. Dicho modelo, está basado en la regresión logística de análisis multivariado, que utiliza variables independientes para predecir la probabilidad, basándose en un conjunto de variables de predicción (Figura 4). El objetivo es determinar la relación entre la variable dependiente (presencia o ausencia de movimientos de ladera) con el conjunto de variables independientes (pendiente, litología, uso del suelo).

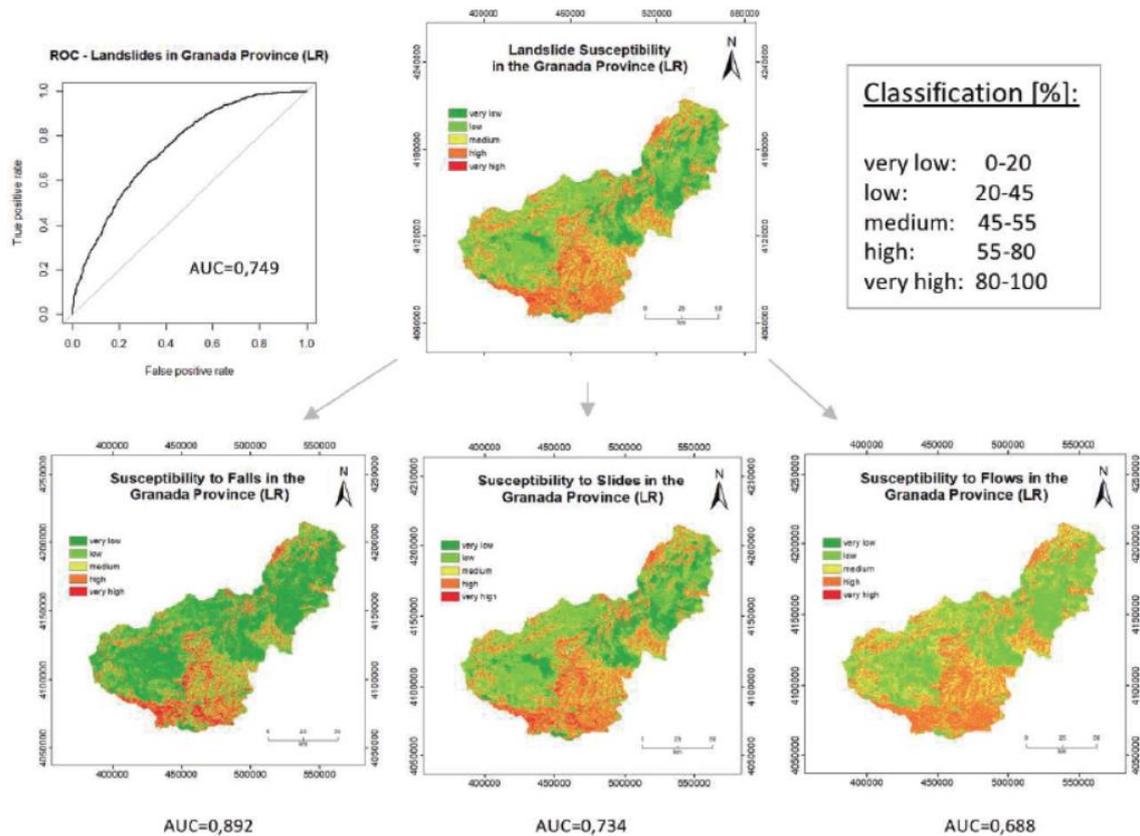


Figura 4. Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera en la provincia de Granada.

La siguiente cartografía que el proyecto RISKCOAST pretende abordar es la referente a la exposición a los riesgos geológicos. La fiabilidad de esta cartografía se basa en la disposición de unos buenos datos de entrada sobre el número de personas, edificios (alojamientos), las infraestructuras, etc.[13,14]

La principal novedad del estudio llevado a cabo es Mallorca es que el análisis de la exposición se ha realizado, considerando no solo la población residente, sino que también la población flotante asociada a la dinámica del turismo (Figura 5). Así ha sido posible diferenciar la exposición a los desprendimientos rocosos, según la temporada baja, media o alta del turismo[15–17]. Además, también se ha tenido en cuenta los elementos estratégicos y fundamentales, a la hora de dar una respuesta a una (por ejemplo, infraestructuras de carácter sanitario o educativo) [18]. Por tanto, en el proyecto RISKCOAST se ha abordado de manera íntegra el análisis de elementos expuestos teniendo en cuenta tanto la perspectiva física como la perspectiva social, combinación que no muchos estudios abordan específicamente. En el proyecto RISKCOAST, se han planteado una serie de indicadores para evaluar los niveles de exposición económica, infraestructural y social. Para ello se ha propuesto una nueva metodología para determinar lo que se ha denominado Índice de Elementos Expuestos (IEE). Los

indicadores seleccionados representan los elementos/factores que influyen en la capacidad de la sociedad para hacer frente a los daños asociados con los desprendimientos de roca y recuperarse de ellos. La información necesaria para obtener estos indicadores se ha recopilado de diferentes bases de datos

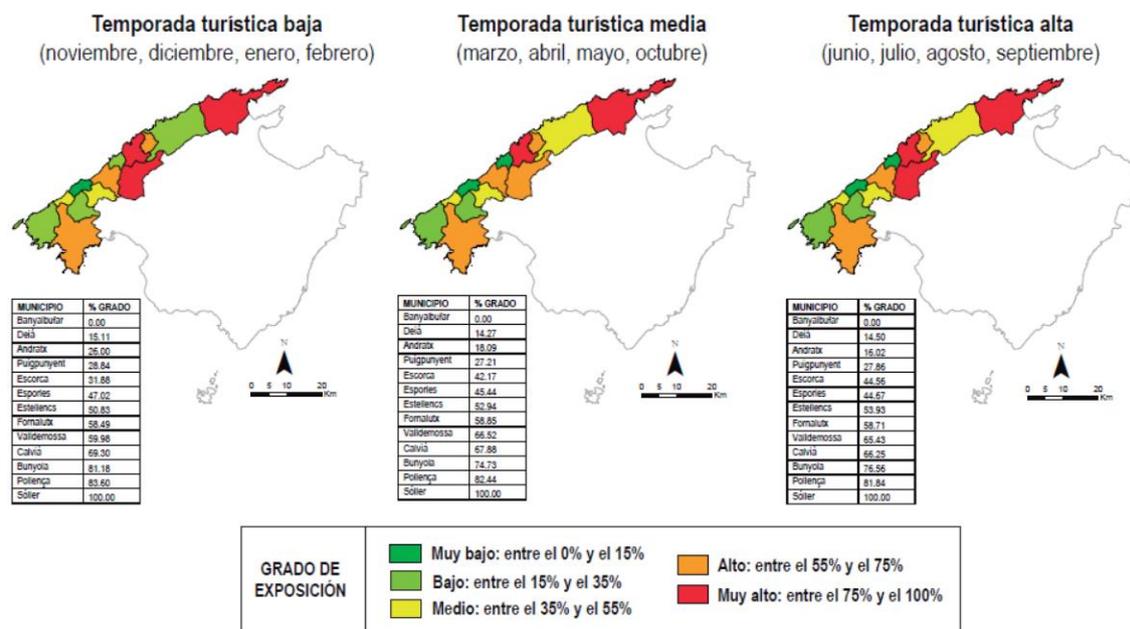


Figura 5. Mapa de elementos expuestos a los desprendimientos rocosos en la Serra de Tramuntana (Mallorca).

3.2. Herramientas basadas en el estudio integrado de la dinámica fluvial y costera

Se ha desarrollado e implementado una metodología para el desarrollo de herramientas de pronóstico de la dinámica hidrológica, fluvial y costera. Estas herramientas incorporan las predicciones de los escenarios de cambio climático publicadas por el proyecto EURO-CORDEX a partir de datos regionalizados de modelos de circulación global (MGC). Previamente, esta metodología ha sido validada con variables de clima marítimo, sobre las que se han obtenido simulaciones a futuro [19]. En el proyecto RISKCOAST se propone la adaptación de dicha metodología a los agentes forzadores que condicionan el sistema hidrológico y fluvial (Figura 6).

Finalmente, se procede a la generación de series de precipitación estadísticamente equivalentes a las analizadas. Para ello se utiliza la técnica de simulación de Monte Carlo. El proceso de simulación comienza con:

- (1) La generación de la pareja D^1, δ^1 del primer evento de tormenta utilizando la cópula.
- (2) Conocida la duración del evento, se genera una serie de precipitación de duración D^1 apoyándose en la estructura del VAR y los modelos de probabilidad mixtos no estacionarios.
- (3) Se le añade el tiempo de calma δ^1 y se repite el proceso hasta que se alcance la fecha de fin de la simulación.

El proceso se repite para los diferentes grupos de estaciones seleccionadas. Generadas las series de precipitación a futuro a partir del registro histórico, se analizan las tendencias comparando con los resultados regionalizados del proyecto EURO-CORDEX. Estas tendencias, para cada uno de los escenarios climáticos futuros, permitirán obtener, a través del modelado hidrológico distribuido y de base física con el modelo WiMMed [24], resultados sobre cambios en el comportamiento hidrológico, los flujos de agua y sedimento y su impacto en el sistema fluvial y costero. Se generará cartografía relacionada con el aumento del riesgo asociado por cambio climático que permitirá identificar zonas vulnerables y de actuación en situación de emergencia.

3.3. Herramientas de apoyo a sistemas de alerta temprana

Las herramientas de apoyo a los sistemas de alerta temprana para diferentes tipos de riesgo y modelos de costa de RISKCOAST tiene como finalidad adaptar herramientas existentes o desarrollar nuevas en caso de necesidad basadas en datos de teledetección (satelital/drones/o terrestre) para apoyar a sistemas de alerta temprana frente a diferentes tipos de riesgo y modelos de costa. El objetivo es proporcionar una solución integrada capaz de absorber datos provenientes de diferentes sensores y generar mapas que puedan ser utilizados como soporte a la prevención y alerta frente a riesgos geológicos. Así, se desarrollarán herramientas informáticas, cartográficas y matemáticas para el apoyo a sistemas de alerta temprana y a la gestión de catástrofes. Estas herramientas estarán basadas en diferentes técnicas innovadoras como la monitorización DInSAR satelital y terrestre, drones, o en simulaciones matemáticas basadas en análisis espectral [25–27]. A continuación, se presentarán algunos de los resultados obtenidos hasta ahora en los sitios de estudio con técnicas de interferometría satelital.

Los resultados que se presentan se han desarrollado utilizando imágenes adquiridas por la pareja de satélites Sentinel-1 (A y B), procesadas en parte a través de la plataforma Geohazard Exploitation Platform (GEP) en parte con la cadena de procesado del CTTC (PSIG), dependiendo de la zona de estudio. Las mayores ventajas de los datos Sentinel-1 es que permiten cubrir áreas a escala regional cubren áreas grandes, de 250x250 km², se adquieren imágenes cada 6 días, y son completamente gratuitos. Geohazard Exploitation Platform (GEP) es una plataforma web desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) que permite la explotación de datos satelitales de Observación de la Tierra (EO) para el análisis de peligros geológicos. GEP proporciona varias herramientas y servicios de procesado, incluida la interferometría de radar (InSAR), que es una técnica efectiva para monitorear procesos geológicos. En particular, en el proyecto RISKCOAST se ha utilizado el servicio Sentinel-1 CNR-IREA SBAS. Mientras que la cadena de procesado PSOG del CTTC permite más flexibilidad y control de todos los pasos del procesado[28]. En el proyecto, por ahora destacan los estudios que se han realizado tanto en las Islas Baleares como en la costa de Granada (Figura 7). En las que se han detectado zonas de interés para llevar a cabo análisis más exhaustivos (Figura 8).

Destaca el estudio llevado a cabo en la zona del embalse de Rules (Granada) en donde los resultados InSAR han permitido caracterizar y delimitar zonas de inestabilidades de laderas, elemento crucial para evaluar preliminarmente los riesgos potenciales asociados a esta infraestructura. Para una mejor caracterización de los movimientos de ladera, que implican un elevado riesgo, se hicieron diferentes procesados locales para mejorar la densidad espacial de información. Gracias a la integración de los resultados InSAR con análisis geomorfológicas, se han podido delimitar 3 principales deslizamientos de tierra activos: Lorenzo, Viaducto de Reglas y deslizamientos de tierra de El Arrecife. Las series temporales de desplazamiento han permitido una caracterización de la actividad de los movimientos, con respecto a las lluvias y al nivel del embalse[29].

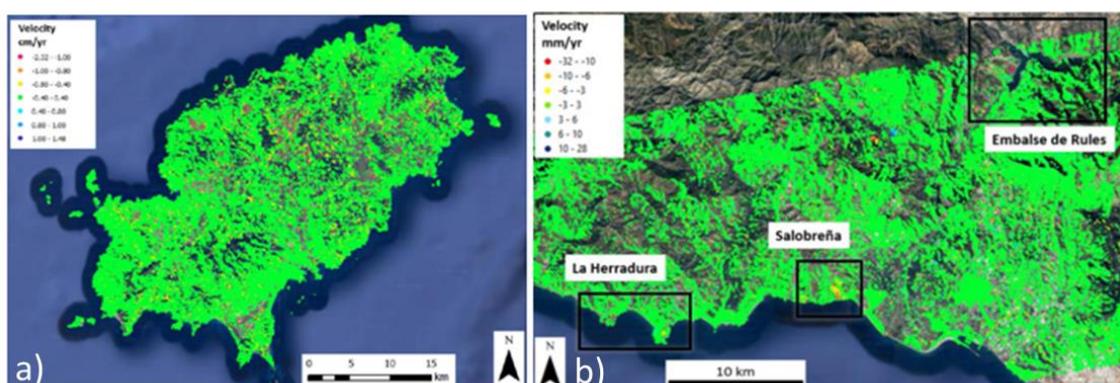


Figura 7. a) Mapa de velocidades (cm/año) derivado por un procesado GEP ascendente. b) Mapa de velocidades (mm/año) derivado por un procesado PSIG ascendente en la Provincia de Granada (Andalucía, España).

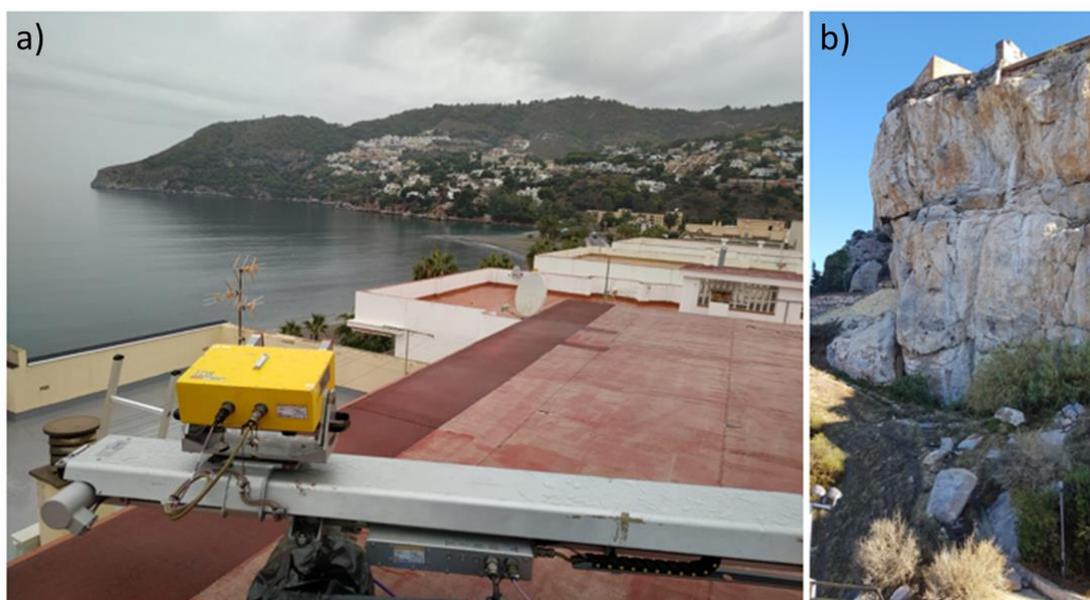


Figura 8. a) Toma de datos por medio de GBSAR terrestre en La Herradura. b) Campaña de campo para analizar el desprendimiento rocoso de Salobreña.

4. PUESTA EN PRACTICA DE LAS HERRAMIENTAS: SIMULACRO DE EMERGENCIA

Las herramientas desarrolladas se testearán por medio de dos simulacros. Esto se hará a través de la realización de dos ejercicios en torno a una mesa en los que se tratará de considerar dos escenarios que permitan testar la aportación de los desarrollos del proyecto RISKCOAST en contextos fenomenológicos y organizacionales diversos: uno de ellos se llevará a cabo en la costa vasca francesa y el otro en la Sierra de Tramuntana en Mallorca.

La integración de las herramientas en los ejercicios implicará testar modelos o herramientas de software desarrolladas o mejoradas en el marco del proyecto, o bien utilizar datos suministrados de forma específica por sensores o por otras herramientas analizadas y desarrolladas en el marco de otras tareas. El ejercicio estrictamente gestionado por el proyecto no permitirá desplegar medios sobre el terreno, pero permitirá implicar a las autoridades locales implicadas en la gestión de la emergencia. El objetivo es al mismo tiempo movilizar: a) los socios científicos del proyecto que tienen competencias locales al objeto de colocarlos en situación de apoyo científico para la gestión de los riesgos, y b) los profesionales de la gestión de los riesgos capaces de utilizar (directamente o mediante los investigadores) las herramientas puestas a disposición por el proyecto para extraer las enseñanzas relacionadas con su uso (Figura 9).

Para el caso de Mallorca se planteará un caso en el que se produzcan riesgos en cascada, en el que principalmente intervengan los desprendimientos rocosos, por ser unos de los riesgos geológicos que más predominan en la isla. Para llevar a cabo estos simulacros se utilizarán además de los productos y herramientas elaborados en el proyecto RISKCOAST, aquellos trabajos que se han venido desarrollando por parte de algunos de los partners en esta zona de estudio [30–32]

Al finalizar los ejercicios se llevará a cabo una evaluación, para obtener las respuestas relacionadas con el uso de las herramientas, con el objetivo de analizar el potencial de su contribución. Estas observaciones se consolidarán en una segunda fase, en las que se llevará un informe sobre las enseñanzas alcanzadas, que será la base para implementar y mejorar las herramientas desarrolladas con el objetivo de una mejor integración en los protocolo y actividades de los usuarios finales (Servicios de Emergencias y Administraciones Locales y Regionales)



Figura 9. Reunión del proyecto Interreg RISKCOAST, de la IV convocatoria SUDOE.

5. MEDIDAS DE REHABILITACIÓN Y PREVENTIVAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

Por último, RISKCOAST pretende también diseñar medidas de rehabilitación más acordes con la naturaleza y perdurables en el tiempo, contribuyendo a un entorno más amable, natural y seguro, para el uso y disfrute de los ciudadanos y visitantes.

Así, en el proyecto se realizarán y elaborarán propuestas reales de medidas de rehabilitación adaptadas a los cambios climáticos, fundamentalmente de tipo naturales, tanto mitigadoras como rehabilitadoras. Con ellas se pretenderá mostrar un nuevo enfoque en el que se fomente el uso de medidas respetuosas con el medio ambiente y promover un cambio de mentalidad hacia medidas de rehabilitación y prevención de carácter natural, duraderas, menos costosas y más sostenibles. El resultado final serán unos documentos donde se definan, diseñen y especifiquen las medidas concretas para cada uno de los riesgos analizados, teniendo en cuenta los diferentes escenarios climáticos considerados, y adaptadas a cada zona de estudio. En este sentido, se buscará establecer medidas paliativas, correctoras y adaptativas al cambio climático, desde una perspectiva integral de los riesgos y considerando el conjunto de la cuenca, una de las novedades más destacadas dentro del proyecto RISKCOAST. Para los diferentes escenarios climáticos, se diseñarán diferentes alternativas para facilitar la selección de la mejor opción tras realizar un análisis multicriterio. La realización de simulacros permitirá conocer la localización y magnitud de los potenciales daños que pueden causar eventos extremos. De esta forma, se pueden diseñar medidas de rehabilitación más eficaces y duraderas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto RISKCOAST (Ref: SOE3/P4/E0868) financiado por el programa Interreg SUDOE (3rd call).

Los autores también quieren agradecer la colaboración y predisposición que han recibido de los partners asociados, a la hora de desarrollar y validar las herramientas y los productos del proyecto RISKCOAST. Estos serían:

- Dirección General de Protección Civil y Emergencias (España)
- Dirección General de Emergencias del Govern de les Illes Balears (España)
- Subdelegación del Gobierno de la Junta de Andalucía en Granada (España)
- Junta de Andalucía (España)
- Diputació de Barcelona (España)
- Ayuntamiento de Motril (España)
- Institut Cartografic i Geologic de Catalunya (España)
- Sistema de Explotación Béznar-Rules (España)
- Asociación Ecologista Buxus (España)
- Autoridade Nacional de Proteção Civil (Portugal)
- Área Metropolitana de Lisboa (Portugal)
- Direção-Geral do Território (Portugal)
- Câmara Municipal de Setúbal (Portugal)
- Syndicat mixte du Bassin de Thau (Francia)



BIBLIOGRAFIA

- [1] Riskcoast Project Available online: <http://www.riskcoast.eu/>.
- [2] Barra, A.; Monserrat, O.; Solari, L.; Herrera, G.; Lopez, C.; Onori, R.; Reichenbach, P.; González-Alonso, E.; Mateos, R.M.; Bianchini, S.; et al. The safety project: Sentinel-1 for the management of geological risk. In Proceedings of the WIT Transactions on Engineering Sciences; 2018.
- [3] Crosta, G.B.; Agliardi, F.; Frattini, P.; Lari, S. Key issues in rock fall modeling, hazard and risk assessment for rockfall protection. In *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2: Landslide Processes*; Springer International Publishing: Cham, 2015; pp. 43–58 ISBN 978-3-319-09057-3.
- [4] Zêzere, J.L. Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Science* **2002**, *2*, 73–82.
- [5] Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 2008, *102*, 14.
- [6] Mateos, R.M.; López-Vinielles, J.; Poyiadji, E.; Tsagkas, D.; Sheehy, M.; Hadjicharalambous, K.; Liscák, P.; Podolski, L.; Laskowicz, I.; Iadanza, C.; et al. Integration of landslide hazard into urban planning across Europe. *Landscape and Urban Planning* **2020**, doi:10.1016/j.landurbplan.2019.103740.
- [7] Vallejo Villalta, I.; Camarillo Naranjo, J. La gestión de los riesgos naturales en el ámbito de la Protección Civil. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* **2000**, 51–68.
- [8] Ayala Carcedo, F.J. Natural disasters mitigation in the world and sustainable development: A risk analysis approach. *Boletín Geológico y Minero* **2001**.
- [9] Sarro, R. Simulación de desprendimientos rocosos para la gestión de emergencias e infraestructuras. PhD Thesis, Universidad de Alicante, 2019.
- [10] Instituto Geológico y Minero de España *BDMoves*; 2016;
- [11] Sarro, R.; Mateos, R.M.; Reichenbach, P.; Aguilera, H.; Riquelme, A.; Hernández-Gutiérrez, L.E.; Martín, A.; Barra, A.; Solari, L.; Monserrat, O.; et al. Geotechnics for rockfall assessment in the volcanic island of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Journal of Maps* **2020**, *16*, 605–613, doi:10.1080/17445647.2020.1806125.
- [12] Rossi, M.; Reichenbach, P. LAND-SE: A software for statistically based landslide susceptibility zonation, version 1.0. *Geoscientific Model Development* **2016**, *9*, 3533–3543, doi:10.5194/gmd-9-3533-2016.
- [13] Fuchs, S.; Birkmann, J.; Glade, T. Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: current approaches and future challenges. *Nat Hazards* **2012**, *64*, 1969–1975, doi:10.1007/s11069-012-0352-9.
- [14] Pellicani, R.; Van Westen, C.J.; Spilotro, G. Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information. *Landslides* **2014**, *11*, 463–480, doi:10.1007/s10346-013-0386-4.
- [15] Murray Mas, I.; Yrigoy Cadena, I.; Blázquez-Salom, M. The role of crises in the production, destruction and restructuring of tourist spaces. The case of the Balearic Islands. *INTURI* **2017**, doi:10.14198/INTURI2017.13.01.
- [16] Riera Font, A.; Ripoll Penalva, A.M.; Juaneda Sampol, C.N. Efficiency and Seasonality in the Balearic Hospitality Industry/Eficiencia y estacionalidad en la industria hotelera balear. *Estudios de Economía Aplicada* **2011**, *29*, 845–862.
- [17] Ramis Coll, M.Á. Análisis socio-espacial de la estacionalidad turística en Mallorca. **2018**.

- [18] Santangelo, M.; Marchesini, I.; Bucci, F.; Cardinali, M.; Cavalli, M.; Crema, S.; Marchi, L.; Alvioli, M.; Guzzetti, F. Exposure to landslides in rural areas in Central Italy. *Journal of Maps* **2020**, *0*, 1–9, doi:10.1080/17445647.2020.1746699.
- [19] Lira-Loarca, A.; Cobos, M.; Losada, M.Á.; Baquerizo, A. Storm characterization and simulation for damage evolution models of maritime structures. *Coastal Engineering* **2020**, *156*, 103620, doi:10.1016/j.coastaleng.2019.103620.
- [20] Restrepo-Posada, P.J.; Eagleson, P.S. Identification of independent rainstorms. *Journal of Hydrology* **1982**, *55*, 303–319, doi:10.1016/0022-1694(82)90136-6.
- [21] Buishand, T.A. Dit proefschrift met stellingen van. **1977**, 222.
- [22] Sklar, A. Fonctions de Répartition à n Dimensions et Leurs Marges. **1959**, *Publications de l'Institut Statistique de l'Université de Paris*, 229-231.
- [23] Lütkepohl, H. *New Introduction to Multiple Time Series Analysis*; Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2005; ISBN 978-3-540-40172-8.
- [24] Herrero, J.; Aguilar, C.; Millares, A.; Egüen, M.; Carpintero, M.; Polo, M.; Losada, M. *WiMMed. User Manual v1.1.*; University of Granada, 2010;
- [25] Sarro, R.; Riquelme, A.; García-Davalillo, J.C.; Mateos, R.M.; Tomás, R.; Pastor, J.L.; Cano, M.; Herrera, G. *Rockfall simulation based on UAV photogrammetry data obtained during an emergency declaration: Application at a cultural heritage site*; 2018;
- [26] Luque-Espinar, J.A.; Mateos, R.M.; García-Moreno, I.; Pardo-Igúzquiza, E.; Herrera, G. Spectral analysis of climate cycles to predict rainfall induced landslides in the western Mediterranean (Majorca, Spain). *Nat Hazards* **2017**, *89*, 985–1007, doi:10.1007/s11069-017-3003-3.
- [27] Crosetto, M.; Crippa, B.; Biescas, E.; Monserrat, O.; Agudo, M.; Fernández, P. Land deformation measurement using SAR interferometry: state-of-the-art. 28.
- [28] Devanthery, N. High-resolution deformation measurement using Persistent Scatterer Interferometry, 2014.
- [29] Reyes-Carmona, C.; Barra, A.; Galve, J.; Monserrat, O.; Pérez-Peña, J.; Mateos, R.; Notti, D.; Ruano, P.; Millares, A.; López-Vinielles, J.; et al. Sentinel-1 DInSAR for Monitoring Active Landslides in Critical Infrastructures: The Case of the Rules Reservoir (Southern Spain). *Remote Sensing* **2020**, *12*, 809, doi:10.3390/rs12050809.
- [30] Sarro, R.; Mateos, R.M.; García-Moreno, I.; Herrera, G.; Reichenbach, P.; Laín, L.; Paredes, C. *The Son Poc rockfall (Mallorca, Spain) on the 6th of March 2013: 3D simulation*; 2014; Vol. 11;.
- [31] Mateos, R.M.; García-Moreno, I.; Reichenbach, P.; Herrera, G.; Sarro, R.; Rius, J.; Aguiló, R.; Fiorucci, F. Calibration and validation of rockfall modelling at regional scale: application along a roadway in Mallorca (Spain) and organization of its management. *Landslides* **2016**, *13*, 751–763, doi:10.1007/s10346-015-0602-5.
- [32] Mateos, R.M.; García-Moreno, I.; Azañón, J.M. Freeze–thaw cycles and rainfall as triggering factors of mass movements in a warm Mediterranean region: the case of the Tramuntana Range (Majorca, Spain). *Landslides* **2012**, *9*, 417–432, doi:10.1007/s10346-011-0290-8.