

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA EXPOSICIÓN A LOS DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS CONSIDERANDO LA ESTACIONALIDAD TURÍSTICA EN LA ISLA DE MALLORCA (ESPAÑA).

ROBERTO SARRO (1), MÓNICA MARTÍNEZ-CORBELLA (1), CRISTINA REYES-CARMONA (1), HÉCTOR AGUILERA (1), MIQUEL ÀNGEL COLL (2), JUAN ANTONIO LUQUE (1), JORGE PEDRO GALVÉ (3), JOSÉ MIGUEL AZAÑÓN (3), ILENIA GRAZIAMARIA GALLO (1), ANNA BARRA (4), MARÍA CUEVAS-GONZÁLEZ (4), ORIOL MONSERRAT (4), ADRIÁN RIQUELME (5), ROSA MARÍA MATEOS (1)

(1) Grupo de Investigación de Observación de la Tierra, Riesgos geológicos y Cambio Climático
Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)
r.sarro@igme.es; m.martinez@igme.es; c.reyes@igme.es; ja.luque@igme.es; h.aguilera@igme.es;
galloilenia94@gmail.com; rm.mateos@igme.es

(2) Grupo de Investigación de Turismo, Movilidad y Territorio
Universidad de las Islas Baleares
miquelangel.coll@uib.es

(3) Departamento de Geodinámica
Universidad de Granada
jpgalve@ugr.es; jazonon@ugr.es

(4) Departamento de Teledetección. División de Geomática
Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Cataluña (CTTC)
anna.barra@cttc.cat; mcuevas@cttc.es; oriol.monserrat@cttc.cat

(5) Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Alicante
ariquelme@ua.es

RESUMEN

En el siguiente trabajo se presenta una nueva metodología para evaluar la exposición al riesgo por desprendimientos rocosos a escala municipal considerando la estacionalidad turística. Esta metodología se ha planteado a través de análisis multicriterio en el que como resultado final se obtiene lo que se ha denominado Índice de Elementos Expuestos (IEE). La metodología está formada por los siguientes pasos: (i) selección de los indicadores; (ii) procesamiento de datos; (iii) normalización de los indicadores; (iv) determinación del peso específico de los indicadores, (v) obtención de la IEE, y, finalmente, (vi) obtención del mapa de elementos expuestos por municipio, y su grado de variación de la exposición teniendo en cuenta la estacionalidad turística. Para estimar el valor del IEE se han presentado siete factores con los que evaluar la exposición de tipo: social (S), infraestructural (I) y ambiental (A).

1. INTRODUCCIÓN

Los desprendimientos de rocas son procesos altamente peligrosos que se producen en las zonas montañosas o escarpadas, a lo largo de todo el mundo. Los daños ocasionados por estos fenómenos suelen ser muy graves debido a las altas velocidades y energías que alcanzan los bloques durante su

caída (Crosta et al., 2015; Hungr et al., 2014; Sarro, 2019), llegando a causar muertes y daños significativos sobre las infraestructuras o las áreas urbanas. Dentro de las acciones clave para la gestión de los riesgos geológicos, y como paso previo a la implantación de medidas preventivas, destaca la necesidad de estimar los potenciales impactos que estos riesgos pueden tener tanto sobre la población como las infraestructuras. Los impactos económicos de los desprendimientos de rocas se suelen clasificar en dos categorías: (a) impactos económicos directos que se asocian a los trabajos de mantenimiento, rehabilitación, etc. que hay que realizar después de estos eventos y (b) impactos económicos indirectos, como daños a la propiedad, lesiones o muertes, o impactos ambientales (Vessely et al., 2017). Generalmente, los estudios sobre el impacto social ocasionado por los desprendimientos de rocas, únicamente se abordan desde la perspectiva de los análisis estadísticos de las pérdidas económicas ocasionados sobre las personas o infraestructuras, o de la inversión necesaria en medidas de protección. Así, no hay referencias sobre el impacto social más allá de las evaluaciones de pérdidas económicas (Mateos et al., 2020). La percepción de riesgo por parte de la sociedad es uno de los principales factores que condicionan el comportamiento de las personas y por lo tanto tiene un impacto decisivo en la capacidad de mitigación, protección y capacidad de resiliencia de las comunidades (Kjekstad & Highland, 2009).

Cuando coinciden zonas de interés turístico con zonas de alta susceptibilidad a los riesgos geológicos, se produce una variación temporal en la consideración de los elementos vulnerables (Fuchs et al., 2012). Varios ejemplos que evidencian esta situación pueden encontrarse realizando una breve búsqueda en las noticias más reseñables sobre movimientos de laderas que han tenido lugar en los últimos años, como los siete turistas resultaron heridos en un desprendimiento de rocas en la playa de Navagio, en la isla griega de Zante en el 2018, o los 33 fallecidos y los más de 500 turistas extranjeros y sus guías que tuvieron que ser rescatados en Nepal después de un deslizamiento de tierras en agosto del 2014. Todos estos eventos tienen como denominador común la agravación del riesgo por una mayor exposición debida al turismo.

Por otra parte, en la actualidad el turismo tiene una gran influencia sobre la economía de los destinos turísticos, como factor de desarrollo y competitividad. Esta circunstancia ha provocado que se lleven a cabo análisis del impacto que tendrían nuevas variables y como condicionarían esta actividad en un contexto socio-económico cada vez más inestable (Duro & Farré, 2015; Murray Mas et al., 2017; Nadal et al., 2004; Ramis Coll, 2018). En este trabajo, se presenta una metodología para analizar la exposición a los desprendimientos de rocas en la Serra de Tramuntana en la isla de Mallorca (España), uno de los destinos turísticos más importantes del continente europeo con 16,5 millones de visitantes al año, en donde la exposición debida al turismo conduce a una intensificación del riesgo.

2. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

El Archipiélago Balear se localiza en el Mediterráneo occidental y está formado por cuatro islas principales: Mallorca, Menorca, Ibiza y Formentera. La isla de Mallorca es la mayor de ellas, con una superficie de 3640.16 km². Geomorfológicamente se distinguen tres grandes unidades en la isla: la Serra de Tramuntana (al NO), las Serres de Llevant (al E) y los Llanos Centrales.

La Serra de Tramuntana, con una orientación NE-SO, 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 estructura geológica de la Serra determina la geomorfología de esta región, con una gran asimetría entre la vertiente meridional de la Serra, menos abrupta, y la vertiente septentrional/costera, más escarpada y con gran desarrollo de acantilados. La costa norte apenas presenta desarrollo de playas, tan sólo existen pequeñas calas generalmente relacionadas con la desembocadura de los torrentes. Los relieves alineados de la Serra están separados por valles longitudinales de cierta entidad que se abren al mar en los extremos de la Serra.

La región de Tramuntana abarca 16 municipios con una población total de 115000 habitantes, con la cara norte mucho más densamente poblada y urbanizada. Destacan los municipios turísticos de Andratx y Calvià al sur de la sierra, con un enorme desarrollo urbanístico en las últimas décadas. La carretera Ma-10 (111 km) constituye la carretera principal de la región y tiene una circulación intensa de automóviles, estimada en un promedio diario de 7200 vehículos. La economía de la región se fundamenta exclusivamente en el turismo, que representa el 95 % de sus ingresos.

En los últimos 30 años la Serra de Tramuntana ha experimentado un gran desarrollo urbanístico, en concreto los municipios turísticos de Calvià y Andratx, aumentando considerablemente el riesgo a los movimientos de ladera. Un claro ejemplo de ello es Cala Llamp cerca de Andratx donde la expansión urbanística se ha realizado en una ladera costera de elevada pendiente.

Geológicamente, la isla de Mallorca se considera una prolongación de la Cordillera Bética que emerge en el Mar Mediterráneo. En la Serra de Tramuntana afloran, mayoritariamente, las rocas sedimentarias que pertenecen a las Zonas Externas de la Cordillera Bética. Las distintas unidades litológicas que se encuentran son las siguientes: Areniscas, arcillas, margocalizas y margas con intercalaciones de yesos; Calizas masivas, calizas nodulosas y dolomías; Margas y margocalizas, generalmente de colores blanquecinos; Conglomerados, calcarenitas, margas y calizas arrecifales; Limos, arcillas y gravas.

3. DATOS Y METODOLOGÍA

3.1 Datos

De cara a establecer los indicadores de exposición a los desprendimientos en la Serra de Tramuntana, se han recopilado datos de tipo infraestructural o espacial y tipo social.

Los primeros se han obtenido de la base de datos del Servei d'Informació Territorial de les Illes Balears (SITIBSA) (*Servei d'Informació Territorial de Les Illes Balears*, 2022). La información recopilada, está formada, tanto por elementos puntuales críticos, como por áreas o zonas sobre las que el impacto de un desprendimiento puede tener especial repercusión.

Como ejemplo de los elementos puntuales destaca la red de carreteras de la isla de Mallorca. Dado que la red incluye diferentes tipologías, se ha decidido tener en cuenta únicamente aquellas carreteras catalogadas como de primer, segundo y tercer nivel, que son por las que transitan más del 97% de los vehículos. Además, también hemos considerado la intensidad media diaria de vehículos (IMD) que circulan por ellas. Otras redes de comunicación, que se han tenido en cuenta son aquellas de tipo ferroviario. Por último, de la misma base de datos, también se han incluido aquellas infraestructuras críticas que pueden verse afectadas durante una emergencia como son los centros Sanitarios, Hospitales, Centros Educativos, y Centros Deportivos (Figura 1).

En cuanto a la información de áreas, se ha puesto énfasis en aquellas de tipo medioambiental, en particular aquellas con denominación Natura 2000 y Espacios Naturales Protegidos.

Para el caso de los indicadores sociales se ha utilizado tanto catálogo de datos estadísticos facilitada por el Instituto Nacional de Estadística (INE) (*Instituto Nacional de Estadística*, 2019), como los datos del Instituto de Estadística de las Islas Baleares (IBESTAT), (*Institut d'estadística de Les Illes Balears*, 2022) con los que ha sido posible realizar un análisis demográfico, y medir la evolución temporal del sector turístico (Figura 1).

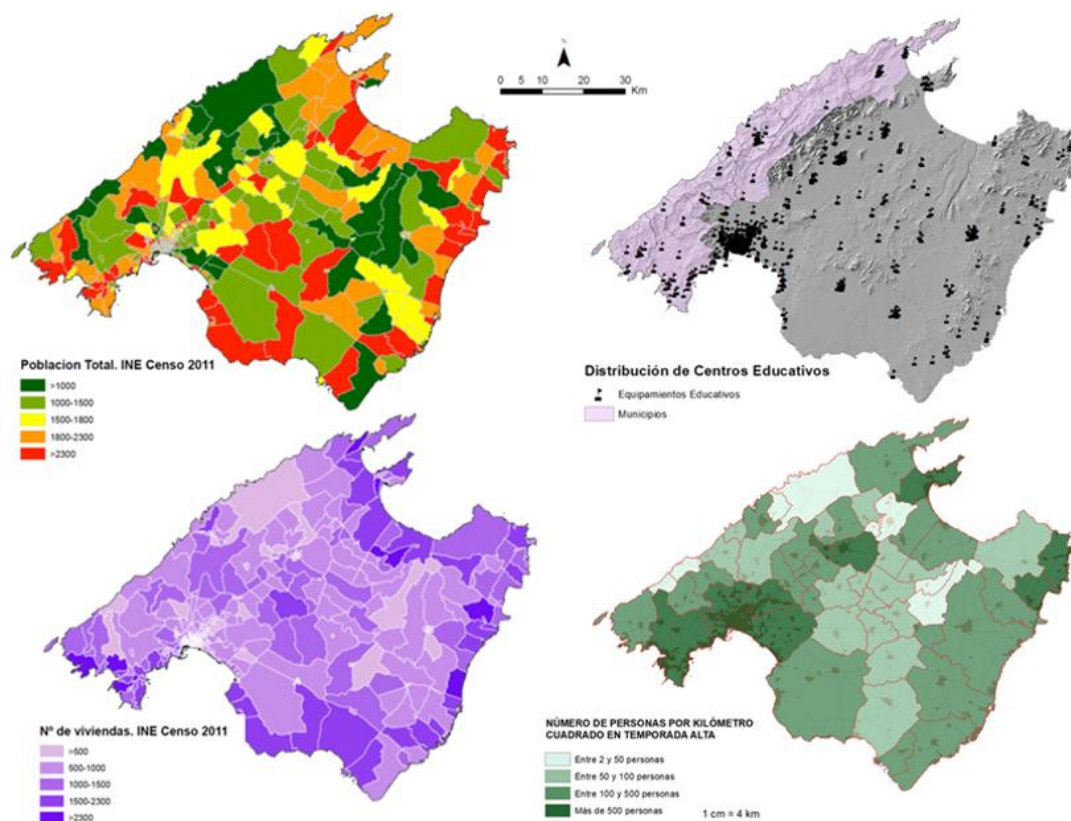


Figura 1. Ejemplos de datos de tipo infraestructural o espacial y tipo social, recopilados para elaborar el Índice de Elementos Expuestos a los desprendimientos rocosos en la Serra de la Tramuntana.

3.2 Metodología

La nueva metodología se ha propuesto introduciendo un índice multicriterio para evaluar la exposición a la caída de rocas a escala regional en el que se ha definido un Índice de Elementos Expuestos (IEE). La metodología sigue los siguientes pasos (i) selección de los indicadores; (ii) tratamiento de los datos; (iii) normalización de los indicadores; (iv) determinación del peso específico de los indicadores, (v) obtención del IEE, y, finalmente, (vi) obtención del mapa de elementos expuestos por un municipio, ajustando los valores a la función de distribución beta, y la variación de la exposición a los desprendimientos a escala municipal según la temporada turística. Para estimar el valor del IEE se han presentado siete factores para evaluar la exposición ambiental (E), infraestructural (I) y social (S) (Ver Tabla 1).

De indicadores de tipo social se han definido tres, en el que se ha considerado el grado de presión humana por cada temporada turística (Alta-Media-Baja), el nivel de estudios, y la edad de la población. Para calcular el indicador del grado de presión humana (IPH) a escala municipal, para ello se realizó una estimación en base a la población residente obtenida del padrón, y a la población flotante (número de turistas). En el caso de la población flotante, los datos se obtuvieron por municipios a partir del número total de plazas turísticas multiplicado por la ocupación promedio para cada una de las temporadas (Alta-Media-Baja). Para el indicador de población en edad vulnerable, se tomaron los datos facilitados por el INE, y se seleccionó aquella población mayor de 64 años y menor de 16. Para el indicador sobre educación, se ha tenido en cuenta aquellas personas analfabetas, sin estudios o estudios primarios. Este indicador no pretende tener en cuenta la falta de conocimiento que pueda tener esta población sobre el riesgo en la zona de estudio (por ejemplo, donde se producen), sino la capacidad de entendimiento de información científica y de asimilación de estrategias didácticas para comprender cómo ocurren estos fenómenos geológicos y qué medidas de protección implantar frente a ellos.

ID	Tipo	Indicador	Fórmula
S1	Social	Población en edad vulnerable por municipio	Número de habitantes >64 y <16 / Habitantes del municipio
S2	Social	Población con bajo nivel de estudios por municipio	Número de habitantes analfabetos, sin estudios, o estudios primarios / Habitantes del municipio
S3	Social	Grado de presión humana por temporada turística	Número Personas por km2 en cada municipio en temporada baja, media y alta
I1	Infraestructural	Densidad de viviendas por municipio	Número total de viviendas / área del municipio (km2)
I2	Infraestructural	Longitud de red de transporte por municipio	Media ponderada de la Longitud de vías según tipología / área del municipio (km2)
I3	Infraestructural	Densidad de infraestructuras críticas	Media ponderada del número de infraestructuras críticas / área del municipio (km2)
E1	Ambiental	Densidad de Espacios Naturales Protegidos	Área de espacio natural protegido / área del municipio (km2)

Tabla 1. Indicadores utilizados para calcular el Índice de Elementos Expuestos (IEE)

En cuanto a los indicadores de tipo infraestructural, en ellos se ha recogido información sobre el número de viviendas a escala municipal, la distribución de la red de transporte y la densidad de infraestructuras críticas. La densidad de viviendas por municipio se ha obtenido dividiendo el número total de viviendas por municipio obtenido en el INE, por el área de cada uno de los municipios. Para la red de transporte se ha considerado tanto la red de carreteras (con sus diferentes tipologías) como la red de ferrocarril. En el caso de la red de carreteras se ha tenido en cuenta el IMD. Para ajustar el nivel de exposición de cada tipo de vía se ha realizado una media ponderada, en la que las carreteras principales se han multiplicado por 0.4, la red ferroviaria por 0.3, las carreteras secundarias por 0.2 y las terciarias por 0.1. Por último, para el indicador de infraestructuras críticas, se han tenido en cuenta los centros sanitarios, los hospitales, los centros educativos, los centros deportivos y centros industriales, por ser aquellos en los que hay una mayor concentración de población (en muchos casos vulnerable), y por ser infraestructuras esenciales en la gestión de una situación de emergencia. En este caso también se ha llevado a cabo una media ponderada.

Finalmente, de tipo ambiental solo se ha seleccionado un indicador. Para su obtención se ha calculado la densidad de espacios naturales protegidos que existe en cada termino municipal. Para ello, hemos utilizado la información del SITIBSA sobre zonas de Red Natura.

A continuación, para asegurar que todos los indicadores sean comparables, se llevó a cabo una normalización de las variables. Gracias a este paso, se ha conseguido armonizar todos los indicadores utilizados, expresándolos en valores adimensionales para facilitar la ponderación y la comparación. En primer lugar, se estandarizaron las variables mediante la siguiente ecuación (Ecuación 1):

$$I_{in} = \frac{I_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (1)$$

Donde, I_{in} es el valor normalizado de los valores del indicador I_i ; μ_i es la media de todos los valores del indicador estudiado, y σ_i es su desviación típica.

Una vez obtenidos los valores normalizados de los indicadores, se re-escalaron mediante una traslación (transformación lineal) con el objetivo de que grandes variaciones de uno o más indicadores no dominen la contribución del resto de los indicadores. Para ello, simplemente se aplicó la diferencia respecto al menor valor normalizado observado entre todos los indicadores estudiados (Ecuación 2).

$$I_{it} = I_{in} - I_{n'min} \quad (2)$$

Donde I_{it} es el indicador transformado, I_{in} es el indicador normalizado y $I_{n'min}$ es el menor valor normalizado obtenido entre todos los indicadores.

A continuación, se obtuvieron los Índices de Elementos Expuestos sociales, infraestructurales y ambientales (IS, II y IA, respectivamente) ponderando los indicadores transformados:

$$IS, II, IA = 0.7 \sum_{i=1}^3 I_{it}, 0.2 \sum_{i=1}^3 I_{it}, 0.1 I_{it} \quad (3)$$

En donde, I_{it} es el valor del indicador estandarizado transformado correspondiente a cada tipo.

Para calcular el Índice Global de Elementos Expuestos (IEE), hubo que aplicar un método heurístico para dar más importancia a los aspectos sociales, seguidos de los infraestructurales y, por último, los medioambientales. Así, el peso asignado a cada factor está relacionado con su relevancia en los impactos a corto plazo sobre la sociedad y la economía de la Sierra de Tramuntana. Por último, para calcular el Índice de Elementos Expuestos Global se ha realizado la suma de cada tipología de índice.

$$IEE = IS + II + IA \quad (4)$$

Además, con el objetivo de hacer una mejor representación de los resultados obtenidos, se ha calculado la distribución probabilística beta, para clasificar el IEE con base en su probabilidad de ocurrencia. Así, se ha definido 4 categorías correspondientes a grado de elementos expuestos Bajo, Medio, Alto y Muy alto.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como resultado de la metodología mostrado en el apartado anterior, se obtiene una tabla (Ver Tabla 2) con el IEE para cada uno de los municipios y para cada una de las temporadas: Temporada Baja (TB), Temporada Media (TM) y Temporada Alta (TA). El mapa de exposición (Figura 2) muestra el grado de exposición a las caídas de rocas de cada municipio de la sierra de Tramuntana para cada temporada turística. Estos resultados muestran un aumento del nivel de exposición durante la temporada turística alta, que afortunadamente es el periodo de menor ocurrencia de desprendimientos de rocas.

Por otra parte, de cara a mostrar cómo es la variación del IEE en cada uno de los municipios se ha realizado la representación por diferencias relativas en donde se puede observar qué municipios se ven más afectados entre una temporada y otra. Para ello se ha calculado la diferencia entre el valor obtenido en la temporada media y en la temporada baja, y se ha comparado con la diferencia obtenida entre la temporada alta y temporada baja (Figura 2). Los resultados se han representado en una gráfica, que ha permitido identificar aquellos municipios que sufren un mayor cambio en la exposición dependiendo de la temporada turística en la que nos encontremos. Así, se puede identificar que municipios como Calviá, Deia, Andraxt, Pollenca y Fornalutx, sufren un gran cambio en el nivel de exposición a los desprendimientos de rocas en función de la temporada turística en la que nos encontremos, mientras que para otros como Bunyola, Escorca o Esporles, el nivel de exposición no sufre un cambio significativo a lo largo de todo el año.

Así, se puede concluir que la metodológica que se presenta en este trabajo contribuye a un conocimiento completo y simplificado de los riesgos asociados a los desprendimientos de rocas en los 13 municipios existentes en la Serra de Tramuntana durante las tres temporadas turísticas. Este es un paso muy significativo a la hora de calcular de manera fiable el riesgo por desprendimiento de rocas pudiendo ser analizado considerando la distribución espacial de la exposición proporcionada por el IEE unido al valor de los elementos, el mapa de susceptibilidad de desprendimiento de rocas y la vulnerabilidad del elemento en riesgo. Este estudio puede proporcionar a las autoridades de protección civil y a otros responsables de la toma de decisiones, una mejor capacidad para evaluar los riesgos por caída de rocas considerando las diferentes épocas del año.

ID	Nombre	Temporada Baja	Temporada media	Temporada alta
0	Andratx	1.335	1.410	1.455
1	Banyalbufar	0.413	0.439	0.444
2	Bunyola	1.049	1.058	1.061
3	Calvià	4.572	5.046	5.337
4	Deià	0.457	0.552	0.575
5	Escorca	0.729	0.729	0.729
6	Esporles	0.902	0.922	0.925
7	Estellencs	0.382	0.420	0.425
8	Fornalutx	0.444	0.478	0.487
9	Pollença	1.661	1.816	1.853
10	Puigpunyent	1.366	1.380	1.383
11	Sóller	1.853	2.068	2.100
12	Valldemossa	0.559	0.590	0.596

Tabla 2. Índice de Elementos Expuestos (IEE) para cada uno de los municipios y para cada una de las temporadas

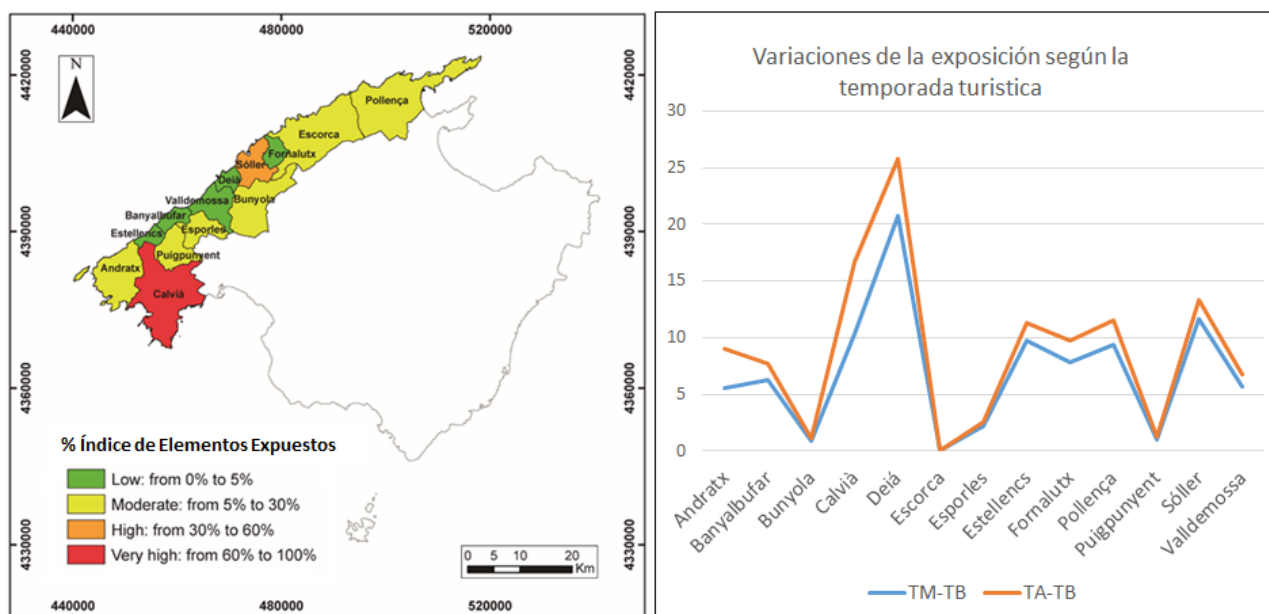


Figura 2. Resultado del IEE para la temporada alta, y grafico con las diferencias de IEE según la temporalidad turística en cada municipio de la Serra de Tramuntana.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha desarrollado en el marco del proyecto RISKCOAST (Ref: SOE3/P4/E0868) financiado por el programa Interreg SUDOE a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

REFERENCIAS

- Crosta, G. B., Agliardi, F., Frattini, P., & Lari, S. (2015). Key issues in rock fall modeling, hazard and risk assessment for rockfall protection. In *Engineering Geology for Society and Territory—Volume 2: Landslide Processes* (pp. 43–58). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_4
- Duro, J. A., & Farré, F. X. (2015). Estacionalidad turística en las provincias españolas: Medición y análisis. *Cuadernos de Turismo*, 36, 157–174. <https://doi.org/10.6018/turismo.36.230921>
- Fuchs, S., Birkmann, J., & Glade, T. (2012). Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis:

- Current approaches and future challenges. *Natural Hazards*, 64(3), 1969–1975. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0352-9>
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. In *Landslides* (Vol. 11). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Institut d'estadística de les illes balears. (2022). <https://ibestat.caib.es/ibestat/inici>
- Instituto Nacional de Estadística. (2019). INE. <https://www.ine.es/>
- Kjekstad, O., & Highland, L. (2009). Economic and Social Impacts of Landslides. In K. Sassa & P. Canuti (Eds.), *Landslides – Disaster Risk Reduction* (pp. 573–587). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_30
- Mateos, R. M., López-Vinielles, J., Poyiadji, E., Tsagkas, D., Sheehy, M., Hadjicharalambous, K., Liscák, P., Podolski, L., Laskowicz, I., Iadanza, C., Gauert, C., Todorović, S., Auflič, M. J., Maftai, R., Hermanns, R. L., Kociu, A., Sandić, C., Mauter, R., Sarro, R., Bejar, M., Herrera, G. (2020). Integration of landslide hazard into urban planning across Europe. *Landscape and Urban Planning*. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103740>
- Murray Mas, I., Yrigoy Cadena, I., & Blázquez-Salom, M. (2017). The role of crises in the production, destruction and restructuring of tourist spaces. The case of the Balearic Islands. *Revista Investigaciones Turísticas*, 13. <https://doi.org/10.14198/INTURI2017.13.01>
- Nadal, J. R., Font, A. R., & Rosselló, A. S. (2004). The economic determinants of seasonal patterns. *Annals of Tourism Research*, 31(3), 697–711. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2004.02.001>
- Ramis Coll, M. Á. (2018). *Análisis socio-espacial de la estacionalidad turística en Mallorca*. <http://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/4444>
- Sarro, R. (2019). *Simulación de desprendimientos rocosos para la gestión de emergencias e infraestructuras* [PhD Thesis]. Universidad de Alicante.
- Servei d'Informació Territorial de les Illes Balears. (2022). <http://www.caib.es/sites/sitibsa/ca/inici-65424/?campanya=yes>
- Vessely, M., Richrath, S., & Weldemicael, E. (2017). Economic Impacts from Geologic Hazard Events on Colorado Department of Transportation Right-of-Way. *Transportation Research Record*, 2646(1), 8–16. <https://doi.org/10.3141/2646-02>