

## ANÁLISIS DEL RIESGO POR MOVIMIENTOS DEL TERRENO EN EL PIRINEO ORIENTAL CON INTERFEROMETRÍA RADAR

**Jordi MARTURIÀ (1), Ivan FABREGAT (1), Pere BUXÓ (1), Anna BARRA (2), Anna ECHEVERRIA (3), Muriel GASC (4), Laura TRAPERO (3), Michele CROSETTO (2)**

(1) Institut Cartogràfic y Geològic de Catalunya (ICGC)

Jordi.Marturia@icgc.cat, Ivan.Fabregat@icgc.cat, Pere.Buxo@icgc.cat

(2) Geomatics Research Unit

Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC/CERCA)

anna.barra@cttc.cat, michele.crosetto@cttc.cat

(3) Andorra Recerca + Innovació

aecheverria@ari.ad, ltrapero@ari.ad

(4) Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement  
(CEREMA)

Muriel.gasc@cerema.fr

### RESUMEN

*El análisis regionalizado del riesgo geológico por movimientos del terreno es complejo a causa de varios factores como la incompletitud y la baja precisión de los datos necesarios para su cálculo, en particular de los inventarios de fenómenos y de la valoración de la vulnerabilidad.*

*La técnica de la interferometría con imágenes radar es sensible a detectar pequeños movimientos del terreno (de orden subcentimétrico) y puede cubrir áreas de gran extensión. Por tanto, permite una detección temprana de los movimientos en zonas amplias. Su aplicación permite obtener miles de puntos con información de movimiento que hace necesario la generación de forma automática de las llamadas Áreas de Deformación Activa (ADA), que representan zonas con puntos de velocidad con valores y movimiento similar.*

*Los mapas de ADA reflejan movimientos de la superficie del terreno, pero no aportan información del proceso que genera el movimiento. Por este motivo es necesario establecer una clasificación de las ADAs según el origen probable de los fenómenos geológicos basada en (i), inventarios de deslizamientos, (ii) en la geología -información del tipo de unidades litológicas- y (iii) en la morfología del terreno (pendiente) que puede ser más o menos propensa a la generación de fenómenos geológicos, y (iv) para determinar las posibles zonas vulnerables en base a los usos del suelo afectados. La valoración del riesgo de los elementos ubicados en las ADA se basa en la intensidad del fenómeno (velocidad del fenómeno) y en el cálculo de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, extraídos de diferentes fuentes cartográficas como: catastro, la base topográfica 1:5.000 del ICGC y/o @OpenStreetMap para ámbitos situados fuera de Cataluña.*

*Esta metodología semiautomática, que combina el análisis de imágenes satelitales a escala regional con la información existente ha permitido establecer una valoración preliminar del riesgo para un conjunto de elementos vulnerables y establecer sus pérdidas potenciales.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso creciente del medio natural, especialmente en regiones de montaña, asociado a segundas residencias, al turismo y a las actividades deportivas, comporta una concurrencia, inusitada antaño, en zonas propensas a la inestabilidad. Las nuevas vías de comunicación y los núcleos urbanos se extienden por lugares en los que los deslizamientos, desprendimientos y otros movimientos ocurren con relativa frecuencia, aumentando así el riesgo y vulnerabilidad para las personas e instalaciones.

El riesgo geológico relacionado con movimientos del terreno produce un impacto económico evaluado en cientos de millones de euros anuales. No obstante, las amenazas geológicas relacionadas con los movimientos de tierra presentan dificultades para su evaluación a escala regional debido a la falta de información detallada sobre la ocurrencia de los fenómenos y el gran número de elementos potencialmente vulnerables existentes en el territorio. Por tanto, el avance de los análisis de riesgos a escala regional puede devenir una herramienta muy útil para la gestión de riesgos.

En este contexto, el análisis territorial de los datos de movimiento del terreno obtenidos por interferometría radar satelital se erige como una herramienta útil para la detección y la valoración de riesgos geológicos en zonas extensas, pero que requiere de conocimiento experto para interpretar correctamente sus resultados. La extracción de forma automática de las zonas de movimiento detectadas, llamadas Áreas de Deformación Activa (ADA), es un primer paso hacia la simplificación de la interpretación y análisis de los mapas de movimientos obtenidos por interferometría radar de satélite.

Debido a la gran extensión territorial y al elevado número de ADA detectadas en este trabajo, para el análisis de los resultados se ha desarrollado una metodología semiautomática para la clasificación rápida de las ADA, en base a criterios morfológicos, geológicos y de afectación a elementos antrópicos. Idealmente, la validación se basa en contrastar la ADA con los datos reales del inventario. Sin embargo, la falta de inventarios completos y exhaustivos requiere del desarrollo de una metodología semiautomatizada previa y de una posterior validación basada en métodos clásicos como la fotointerpretación y el trabajo de campo.

A partir de la peligrosidad natural de los fenómenos detectados, del grado de daño esperado sobre los distintos elementos antrópicos expuestos a la acción de los fenómenos (vulnerabilidad) y de la cuantificación de los elementos potencialmente afectados (exposición), se estima el riesgo generado por los movimientos del terreno detectados por las ADA.

En este artículo se presenta un primer análisis a nivel regional del riesgo potencial en base a la interpretación del peligro de los movimientos del terreno en función de la velocidad del ADA asociada. La velocidad es la base para estimar la peligrosidad de los movimientos pues permite realizar una primera estimación de la afectación potencial de los elementos vulnerables, basada en dos fuentes de información: 1) en el Mapa de cubiertas del suelo de Cataluña elaborado por el Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC) y (2) la Base topográfica 1:5.000 del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC) o el @OpenStreetMap.

*Este proyecto ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020).*

## 2. CONTEXTO

El área de estudio se ubica en la zona oriental de los Pirineos en el ámbito del proyecto MOMPA, repartida entre: Andorra (468 km<sup>2</sup>), España (2,000 km<sup>2</sup>) y Francia (1.600 km<sup>2</sup>). Concretamente incluye las comarcas del Alt Urgell y La Cerdanya (España), el principado de Andorra y las comarcas del Capcir y Conflent (Francia).

La morfología y geología existente, juntamente con la climatología propia del área genera una dinámica de vertiente muy activa. Existen numerosos antecedentes históricos de fenómenos geológicos (esencialmente deslizamientos y/o desprendimientos) que han afectado de una forma importante al territorio objeto de estudio (p. ej., Colas, 2013).

Geológicamente, es un área con importantes relieves, generalmente abruptos, resultado de los apilamientos de los mantos cabalgantes resultado de la colisión entre la Placa Ibérica y Europea que se inició al final del Cretácico, y que provocó la formación sendas cuencas de antepaís al norte y sur. Su relieve es el resultado de los últimos pulsos orogénicos y una intensa actividad geomorfológica (Puigdefàbregas et al., 1986). Mayoritariamente está formada por los materiales paleozoicos de la zona axial pirenaica (Andorra), por rocas neógenas y pliocenas de la fosa de la Cerdanya (La Cerdanya); por rocas mesozoicas carbonatadas y paleozoicas carbonatadas y detríticas del manto de corrimiento inferior del Cadí (Alt Urgell) (Burbank et al., 1992; Barnolas et al., 2001); rocas carbonatadas miocenas y paleozoicas compuestas esencialmente por granitos, gneis, esquistos y mármoles (Capcir y Conflent) (.).

Las características litológicas del terreno son un factor condicionante en los riesgos geológicos. Así, en el caso de los deslizamientos y los flujos suelen ser especialmente problemáticas las unidades arcillosas, como las lutitas negras del Silúrico, las arcillas rojas del Triásico medio, las arcillas rojas del Triásico superior, y algunos depósitos cuaternarios glaciares y de antiguos movimientos de ladera. Y en el caso de los hundimientos, a menudo están relacionados con unidades que pueden acumular espesores significativos de yesos, como las lutitas con yesos del Triásico superior. En las caídas de roca, las pendientes son más determinantes que la litología. Aunque por su altura son significativos los escarpes y desfiladeros en las calizas cretácicas y en los conglomerados oligocenos.

La orografía pirenaica supone un entramado de barreras climáticas que, juntamente con la complejidad del clima mediterráneo y la influencia atlántica, genera múltiples microclimas con comportamientos meteorológicos muy diversos para una misma situación. La climatología asociada es predominantemente de montaña, con características generales de rigor y valores extremos, pero con muchas variaciones en todo el ámbito.

La climatología es un factor clave en la generación de los riesgos geológicos. En los movimientos de laderas (deslizamientos, caída de rocas y flujos) la pluviometría es un factor desencadenante presente en una gran parte de los eventos, teniendo lugar durante o inmediatamente después de episodios de lluvias intensas o continuadas. También los ciclos de hielo y deshielo favorecen estos movimientos. En el Pirineo se recogen episodios de precipitaciones generalizadas muy intensas en períodos de retorno aproximados de 30 o 40 años. Estas situaciones provocan crisis que pueden llegar a ser catastróficas al generar movimientos de ladera simultáneos que se combinan con riadas y barrancadas. Como ejemplos los casos de las inundaciones en la cuenca del Segre de octubre de 1907, de octubre de 1937 (Alt Pirineu), de noviembre de 1982 (Valira y el Segre) asociadas a fuertes temporales. Un caso de deslizamiento asociado a estos temporales es el de noviembre de 1982 en Pont de Bar (Alt Urgell) que obligó a reubicar la localidad de Pont de Bar.

### **3. DETECCIÓN DE MOVIMIENTOS: DATOS DE INTERFEROMETRÍA RADAR**

#### **3.1. Descripción de la técnica**

Las técnicas interferométricas de radar multitemporal utilizan la diferencia de fase entre las imágenes adquiridas por radares de apertura sintética (SAR) para estimar las diferencias atribuibles a movimientos del terreno entre largas series de imágenes.

A partir del tratamiento de estas imágenes se obtienen puntos sobre el territorio con la velocidad promedio (normalmente expresada en mm/año) y su serie temporal de desplazamiento asociada. De esta manera el conjunto de puntos obtenidos se constituye como una especie red de monitoreo natural, con una densidad espacial muy elevada (de hasta centenares de puntos por km<sup>2</sup>) en zonas urbanizadas con precisión milimétrica.

Entre las ventajas de la utilización de esta técnica hay que destacar la posibilidad de obtener estimaciones precisas de la velocidad de desplazamiento, con precisión milimétrica sobre una red de medida muy densa, especialmente en zonas urbanizadas, sin necesidad de contacto directo con la zona de prospección y sin necesidad de instalar instrumentación. También hay que destacar la amplia disponibilidad de datos de radar, que permite, por tanto, realizar análisis históricos,

permitiendo recuperar información de otra forma no disponible con las técnicas tradicionales de monitorización terrestre;

Hay que tener en consideración que la técnica InSAR presenta limitaciones que no permiten cubrir de una manera homogénea el terreno y que hay que tener en cuenta en el momento de implantar esta técnica entre la cuales se destacan las siguientes:

- Respecto a la superficie del terreno que refleja la señal radar: permite obtener una alta cantidad de datos en zonas urbanas o rocosas que presentan una coherencia en los puntos de retorno de la señal, sin embargo, no ocurre lo mismo sobre zonas cubiertas de vegetación (naturales o agrícolas) quedando limitada su utilidad en este entorno. De hecho, es esencial que la superficie que refleja la señal del radar no cambie en el tiempo.
- Respecto a la velocidad del movimiento: condicionada por el procesamiento de la longitud de onda, no permite la detección de movimientos superiores a unos 80 cm/año. Y siendo el límite inferior de 2 a 3 mm/año.
- Respecto a la geometría de adquisición. La órbita y la orientación del sensor condicionan la capacidad de detección de deformaciones al largo de la dirección de LOS (*light of sight*); dependiente de la orientación de los taludes, los desplazamientos pueden ser apropiados al desplazamiento total o sólo una pequeña fracción de éste. Así, los movimientos en dirección E-O se puedan monitorizar correctamente, a diferencia de los N-S que pueden llegar a pasar desapercibidos.

### 3.2. Mapa de movimientos del terreno

Para la generación del mapa de movimientos del terreno se han procesado un total de 150 imágenes de órbita descendente (LOS dirección de E a O) que cubren el período desde el 6 de marzo de 2015 hasta el 15 de noviembre de 2019. Las imágenes tienen en general una separación temporal de 6 o 12 días. No obstante, no cubren los periodos invernales (diciembre-mayo), que han sido eliminados en base a un estudio de coherencia (matriz de coherencia), debido a la cobertura de nival existente en las áreas durante esta época del año.

El mapa de velocidad de deformación se ilustra en la Figura 1, donde se puede observar los 2.904.322 puntos de medición obtenidos. El mapa contiene las velocidades de deformación del periodo observado (2015-2019) proyectadas en la línea de vista del satélite Sentinel. Los valores de velocidad de movimiento negativos representan los desplazamientos que se alejan del satélite, los valores positivos los que se acercan al satélite.

### 3.3. Mapa de Áreas de Deformación Activa (ADA)

El resultado de la técnica muestra centenares de miles de puntos que se distribuyen de manera variable por el territorio, dificultando mucho su análisis. Para solventar esta problemática es necesario la generación de áreas de movimiento homogéneas. Este análisis de tipo “punto caliente” es una aproximación para reducir el tiempo necesario para inspeccionar un conjunto de datos interferométricos compuesto por miles o millones de puntos. Así, las áreas de deformación activa (ADA) se derivan de los datos de interferometría radar con valores de velocidades más elevados obtenidos a partir de los datos de media resolución del Sentinel-1A/B. Esto se realiza mediante la extracción semiautomática realizada con el software ADAFinder (Barra et al. 2017; Navarro et al., 2019). El mapa resultante de las ADA de la zona de estudio se ilustra en la Figura 2, donde se aprecia la distribución de las aproximadamente 1000 ADA Sentinel 1 A/B detectadas.

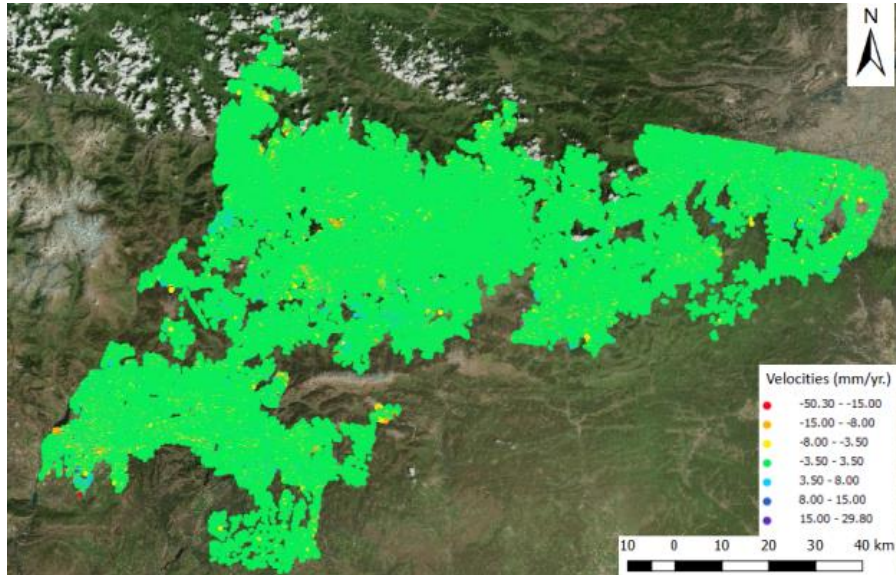


Figura 1. Mapa de velocidad de deformación, donde se puede observar los 2.904.322 puntos de medición obtenidos para el periodo observado (2015-2019) proyectadas en la línea de vista del satélite Sentinel-1.

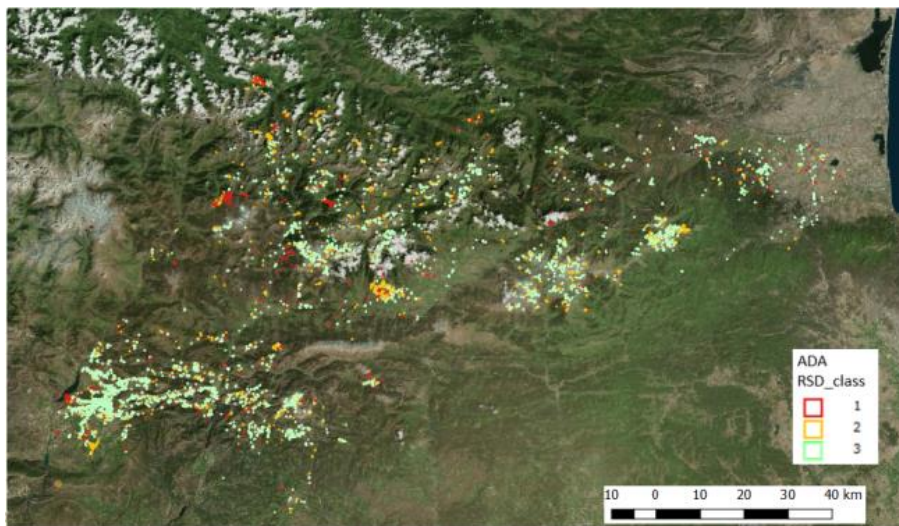


Figura 2. Mapa de ADA del área de estudio obtenidas a partir de la herramienta ADA Finder.

Las ADA han sido clasificadas según el valor de velocidad media de deformación (VEL\_CLASS). Esta clasificación se divide en dos clases (Class\_0: VEL\_CLASS < 5 mm / año; Class\_1: VEL\_CLASS > 5 mm / año) siendo el nivel Class\_0 el de menos confiabilidad. Los valores Class\_1, con velocidades medias superiores a 5 mm / año, indican que los puntos que contiene la ADA son superiores al *stability threshold*, marcador de fiabilidad del nivel de ruido de las ADA.

#### 4. ANÁLISIS DEL RIESGO: METODOLOGIA, VALORACIÓN Y RESULTADOS

##### 4.1. Descripción metodológica

El mapa de las ADA contiene las Áreas de Deformación Activa detectadas, sin embargo, no proporciona información sobre el tipo de fenómeno, el mecanismo o sobre su potencial riesgo a bienes o personas. Aunque la intensidad de un movimiento del terreno se puede definir en base a la velocidad promedio de la ADA, es necesario analizar las ADA con datos geológicos, topográficos, geomorfológicos y geotécnicos (por ejemplo, registros geológicos o inventarios de movimientos del terreno) para determinar el fenómeno causante, su naturaleza y evaluar el riesgo

potencial sobre los elementos vulnerables expuestos.

El análisis de las ADA se puede establecer a través de tres enfoques metodológicos dependiendo de la disponibilidad y calidad de datos geológicos.

- 1) Focalización en zonas con inventario exhaustivo, se parte de los datos de inventario de movimientos del terreno y los datos geotécnicos.
- 2) La ausencia de inventarios de fenómenos completos y exhaustivos hace necesaria una metodología por fases y evolutiva del conocimiento partiendo de los datos geológicos preexistentes (geología regional, etc.).
- 3) Enfoque mixto, por un lado, se utiliza el amplio conocimiento sobre riesgos geológicos existentes, por otro lado, se complementa con la metodología semiautomática regional.

En condiciones ideales, la identificación de las ADA se basaría en el contraste con datos de inventarios de fenómenos. No obstante, la falta de inventarios sistemáticos del territorio (no son completos ni exhaustivos y homogéneos para el conjunto del territorio) hacen necesaria la validación en base a métodos como son la revisión de antecedentes, la interpretación de fotografía aérea y el trabajo de campo. Este es un método muy seguro, pero costoso que necesita de una elevada dedicación de recursos dado el gran volumen de zonas con deformación activa identificadas. Por ende, es necesario establecer una metodología por fases con el objetivo de limitar y simplificar los costes de adquisición de información (Figura 3). La primera Fase consiste en el uso de capas de información existentes (geoindicadores) de fácil implementación en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la catalogación semiautomática de las ADA en función del fenómeno causante y su riesgo potencial.

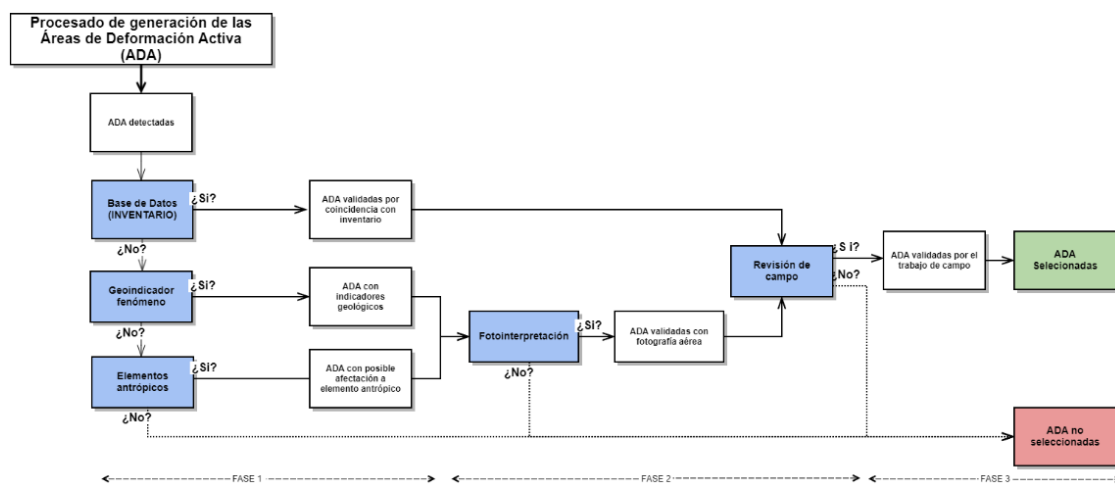


Figura 3. Diagrama de flujo con la metodología de trabajo empleada para clasificar las ADA.

Una segunda Fase, incluye la revisión de los resultados seleccionados de la Fase 1 mediante estudios de fotointerpretación y finalmente, una tercera Fase que incluye un trabajo de campo de la revisión de las ADA identificadas más significativas. La Fase 2 consiste en estudios de fotointerpretación y la Fase 3 se basa en la validación con trabajo de campo. Como resultado de esta metodología se obtienen el Mapas de Áreas de Deformación Activa que se presentan en las denominadas “Fichas descriptivas de las Áreas de Deformación Activa” donde se resume de forma gráfica y metódica toda la información obtenida. Estas fichas se dividen en tres tipos, según la fase del estudio, un para cada Fase: (1) las fichas ADA con la clasificación preliminar obtenida en la Fase 1, (2) las fichas ADA con la validación aportada por la fotografía aérea incluyen información de fotointerpretación de experto: fenómeno interpretado, descripción, valoración del elemento vulnerable y (3) las fichas descriptivas ADA seleccionadas como candidatas y que resumen los trabajos campo (cortes geológicos, fotografías ...).

Una vez estudiadas y seleccionadas las ADA en base al fenómeno y uso del suelo detectado, se analiza el riesgo potencial de los elementos afectados por los movimientos identificados. a partir de bases cartográficas como la Base Topográfica 1\_5.000 para el Alt Urgell y La Cerdanya).

Finalmente, se ha implementado un cálculo preliminar del riesgo de los elementos afectados por ADA en base a una estimación de los daños (estético, funcional o estructural) de los principales elementos antrópicos expuestos (edificios, carreteras y ferrocarriles).

#### 4.2. Clasificación de las ADA

Con la finalidad de analizar, interpretar y discernir las ADA más relevantes de una manera sencilla se usan capas de información existentes, denominadas geoindicadores. Los geoindicadores se definen utilizando un enfoque cualitativo basado en un análisis preliminar de los datos auxiliares disponibles. En este caso, para un análisis a escala regional, se ha limitado a tres los parámetros para establecer las características de las ADA: por un lado, (1) la pendiente y (2) las unidades geológicas para definir el fenómeno y por otro (3) el mapa de usos del suelo para determinar la potencial afectación a zonas vulnerables. Esto permite obtener una primera catalogación de las ADA para optimizar y priorizar los trabajos de fotointerpretación y de campo.

##### 4.2.1. La pendiente

La pendiente del terreno es un condicionante del tipo de fenómeno geológico que puede ser el origen del movimiento del terreno. De esta manera, los movimientos en terrenos planos se pueden relacionar con hundimientos (colapsos o subsidencia), mientras que en pendientes mayores pueden corresponder a deslizamientos o desprendimientos. Además, es un parámetro fácil de calcular a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT). Por ejemplo, para las zonas de Catalunya y Andorra se ha utilizado el MDT de resolución de 5 m. Existen otros MDT de mayor resolución (2x2) pero su procesado para un área tan extensa sería costoso computacionalmente y, dada la escala de trabajo, no aportaría mucha más información. Por otro lado, se ha descartado utilizar modelos de menor resolución (15x15), porque tienen tendencia a suavizar en exceso la morfología del terreno y promediar excesivamente a la baja las pendientes del terreno.

Para este estudio, en base a la experiencia, se han establecido seis intervalos de pendiente que pueden condicionar la generación de los distintos fenómenos (Tabla 1). Y, de forma general, se considera que la susceptibilidad a la generación de los fenómenos geológicos se asocia a los intervalos de pendientes expuestos en la Tabla 2.

Clase Pendiente					
< 5°	5° – 15°	15° – 25°	25° – 35°	35° – 45°	> 45°
1	2	3	4	5	6

Tabla 1. Clases de pendiente para el estudio de las ADA.

Deslizamientos	Pendiente	Clase
3 - Alta	25°-45°	4,5
2 - Media	>15°	3
1 - Baja	>5°	2
0 - Por encima de 45° se ha de considerar siempre como desprendimientos.	>45°	
Desprendimientos	Pendiente	
2 - Alta	>45°	6
1 - Media	>35	5
0 - Por debajo de 35° se ha de considerar siempre como deslizamientos.	<35°	
Hundimientos	Pendiente	
3 - Alta	< 5°	1
0 - Por encima de 5 se ha de considerar siempre como deslizamientos	>5°	

Tabla 2. Grado de susceptibilidad según la pendiente y el fenómeno.

#### 4.2.2. La geología

La información geológica es esencial para la clasificación y catalogación de las ADA, pues el material del subsuelo determina en gran medida la susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera o hundimientos.

Para Cataluña se dispone de la cartografía geológica 1:50.000 para todo el territorio. Esta cartografía es una síntesis continua de la información geológica de todo el territorio, fruto de la colaboración entre diversos organismos (ICGC, IGME...). En el área de estudio se han reconocido 122 unidades geológicas que se han clasificado según su propensión a deslizamientos (DESL) o desprendimientos (DESP). No se ha establecido una clasificación aplicable a hundimientos porque estos fenómenos suelen estar asociados a litologías que están en el subsuelo (no afloran) y, dado la escala de la base, no se ha considerado aplicable. Se trata de una aproximación preliminar y que no tiene en cuenta particularidades geológicas no recogidas en esta cartografía

Como criterio general para deslizamientos se aplica el siguiente criterio (Tabla 3):

Propensión	Descripción
3 - Alta	Depósitos cuaternarios de deslizamientos de unidades lutíticas plásticas
2 - Media	Unidades donde predominan las lutitas plásticas (silurianas, triásicas y garumnianas) y depósitos deslizados en general
1 - Baja	Unidades donde predominan las lutitas y las formaciones superficiales no cimentadas.
0 - No se considera	Resto de unidades

Tabla 3. Susceptibilidad al deslizamiento según el criterio geológico.

Como criterio general para desprendimientos se aplica el criterio de la Tabla 4:

Propensión	Descripción
2 - Alta	Unidades de rocas masivas
1 - Media	Unidades con alternancia de rocas masivas y blandas
0 - No se considera	Resto de unidades

Tabla 4. Susceptibilidad al desprendimiento según el criterio geológico.

#### 4.2.3. Criterios de clasificación

En función de la descripción de las unidades geológicas se establece una valoración de la propensión a los movimientos del terreno en base a la litología y a las clases de pendiente descritas (Tabla 5). Se trata de una aproximación preliminar que no tiene en cuenta particularidades geológicas no recogidas en la escala de trabajo de la geología regional (1.50.000).

		Clase Pendiente					
		1	2	3	4	5	6
Geología esl	1	N	S	S	S	N	N
	2	N	N	S	S	N	N
	3	N	N	N	S	N	N
Geología Desp	1	N	N	N	N	N	S
	2	N	N	N	N	S	S

Tabla 5. Criterio de clasificación en función de la susceptibilidad de las unidades geológicas al fenómeno.

#### 4.2.4. Usos del suelo

La cartografía de usos del suelo facilita la clasificación de la ocupación y los principales usos del territorio. En base al tipo de uso que está afectado por la ADA, se puede establecer una primera



identificación de las zonas potencialmente vulnerables.

Se elaboró una primera identificación de los elementos potencialmente vulnerables a partir de las coberturas del suelo (MCSC), un mapa derivado de las directrices estandarizadas a nivel europeo de acuerdo con el modelo INSPIRE Land Cover. A partir de esta clasificación, se estableció una primera categorización de vulnerabilidad, dividida en cuatro grados de vulnerabilidad (3 -Alta, 2 -Media-, 1 -Baja, 0 -Nula-), en función de la importancia de las potenciales pérdidas (importancia del daño), asumiendo que los elementos antrópicos implican una mayor pérdida potencial y los espacios naturales prácticamente nula (Tabla 6). Esta identificación se detallará más en análisis locales, en base a cartografías topográficas vectoriales de detalle.

VULNERABILIDAD	MCSC-2
3 - Alta	Zonas urbanizadas
2 - Media	Vías de comunicación
	Zonas deportivas y lúdicas
	Zonas de extracción minera
1 - Baja	Aguas continentales
	Cultivos
0 - No se considera	Bosques densos (no de ribera)
	Bosques de ribera
	Boques claros (no de ribera)
	Matorrales
	Prados y hierbazales
	Roquedales
	Suelos desnudos
	Tarteras

Tabla 6. Vulnerabilidades al fenómeno según el tipo general de uso del suelo.

#### 4.3. Resultados

En base a los criterios geológicos y morfológicos establecidos y al criterio de clasificación de la Tabla 5, se han identificado para el caso de Catalunya 81 zonas activas susceptibles a deslizamientos, y 45 zonas susceptibles a desprendimientos.

Hay que tener presente que una sola ADA puede incluir áreas con distinto uso del suelo (también puede contener más de una geología o clase de pendiente y, por lo tanto, más de una susceptibilidad). Para este análisis se ha contabilizado la presencia del suelo más vulnerable dentro de la ADA. Por lo tanto, en base a la clasificación establecida (Tabla 6) se han reconocidos un total de 72 ADA que incluyen algún nivel (1, 2 o 3) de usos del suelo potencialmente vulnerable (Tabla 5).

VULNERABILIDAD	TOTAL ADA
3 - Alta	6
2 - Media	17
1 - Baja	49

Tabla 5. Número de ADA por cada una de las cuatro categorías de vulnerabilidad.

La información de esta primera clasificación se sintetiza en fichas resumen de información tal como se muestra en la figura 2, con la información de la ADA, del potencial fenómeno generador del movimiento y de las posibles afectaciones.

Como ejemplo de ficha descriptiva preliminar de las ADA derivada de los trabajos de la Fase 1, se presenta el ejemplo de la ADA 912 (Figura 4). La ficha incluye cuatro mapas: (1) con la ortofoto vigente y el mapa de velocidades, (2) con la geología regional, (3) con el mapa de pendientes, y (4) con el Mapa de Cubiertas del Suelo. El ADA 912 fue asignada con una susceptibilidad a deslizamientos y con una vulnerabilidad Baja (grado 1). En este caso la validación de la técnica fue óptima pues se trata de una zona con antecedentes de actividad de

deslizamientos conocidos entre los años 1891 y 1907.

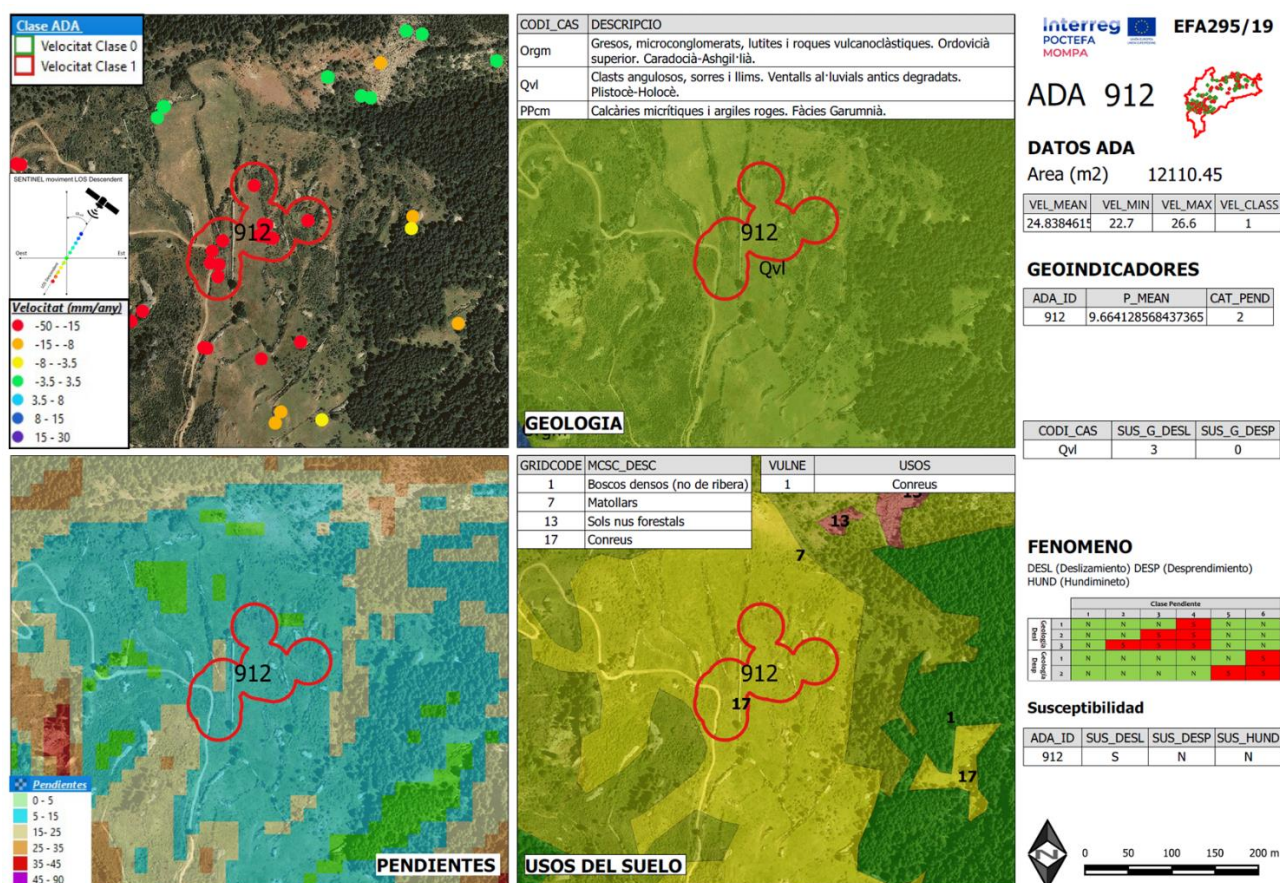


Figura 4. Ejemplo de ficha descriptiva de la ADA con los resultados de la Fase metodológica 1. Se pueden observar los resultados de susceptibilidad y vulnerabilidad.

#### 4.4. Valoración del riesgo sobre elementos vulnerables específicos

Una primera identificación del riesgo potencial de las ADA se estableció a partir de la clasificación de las ADA y su posible afectación a zonas urbanas con la información de los mapas con información sobre usos del suelo (ver Tabla 5). Sin embargo, esta identificación por sí misma, no se puede considerar como una estimación del riesgo.

La evaluación del riesgo geológico puede calcularse a través de la expresión: "R = P\*V\*E"

Donde P es el peligro (peligrosidad) del proceso en cuestión, V es la vulnerabilidad de los elementos expuestos al proceso (probabilidad) y E es su exposición.

Para su cálculo se ha desarrollado una metodología con los pasos siguientes:

- Determinación de la peligrosidad en función de los umbrales de velocidad media fijados para los fenómenos geológicos detectados (Tabla 6).
- Asignación de la vulnerabilidad de los elementos identificados según su tipología.
- Identificación de los elementos vulnerables potencialmente afectados por las ADA a partir de información del catastro, de la base topográfica 1:5.000 (BT-5M) del ICGC, del catálogo de carreteras de la DGIM y del @OpenStreetMap.
- Determinación del riesgo potencial de los elementos vulnerables identificados a partir de la vulnerabilidad descrita por la tipología de cada elemento y de la intensidad de la ADA.

##### 4.4.1. Determinación de la Peligrosidad

La peligrosidad (P) se define como la probabilidad de ocurrencia de un proceso geológico potencialmente dañino, con un nivel de intensidad durante un tiempo determinado en un área

específica. Para su evaluación es necesario conocer: (1) dónde y cuándo ha ocurrido, en la actualidad o en el pasado; (2) la magnitud e intensidad de los procesos ocurridos; (3) las zonas donde pueden ocurrir futuros procesos; (4) y su frecuencia de ocurrencia (periodo de retorno).

La intensidad (I) de los deslizamientos de tierra es una componente indispensable para calcular la peligrosidad (P) y se puede expresar mediante varios parámetros entre los que se incluyen el volumen, la velocidad, la profundidad, la escorrentía y extensión. En este trabajo se aplica el método de la intensidad de la ADA definida por la velocidad media de las ADA (Tabla 6), pues permite obtener rápidamente una clasificación. La determinación de la intensidad se aplica cuando la ADA se superpone directamente sobre elementos antrópicos potencialmente vulnerables.

INTENSIDAD ADA (I)	VELOCIDAD MEDIA (mm / año)
$I_1$	< 16
$I_2$	16 – 32
$I_3$	> 32

Tabla 6. Umbrales de velocidad media para la determinación de la intensidad de los fenómenos geológicos detectados por las ADA. Fuente: proyecto U-Geohaz.

Según la escala de velocidad de deslizamientos de Cruden y Varnes (1996), el primer umbral (16 mm / año) es representativo del paso entre deslizamientos considerandos extremadamente lentos y muy lentos.

#### 4.4.2. Determinación de la vulnerabilidad física de los elementos expuestos

La vulnerabilidad (V) de una estructura se define como el grado esperado de pérdida experimentado por los elementos en riesgo para una determinada magnitud de peligro. Su evaluación depende de varios parámetros como la conservación del edificio, el tipo de construcción, la tipología del deslizamiento de tierra, la energía cinética en el momento del impacto, ..., y suele expresarse como el grado de pérdida esperado ante una cierta acción en un intervalo entre 0 y 1 (0, sin ninguna afección; 1, pérdida total). En este trabajo el cálculo de la vulnerabilidad se basa en la metodología desarrollada en el proyecto europeo “Evaluación del impacto de los riesgos geológicos para áreas urbanas (U-Geohaz, ref. UCPM-2017-PP-AG-783169)” (Solari, et al., 2018; Montserrat et al., 2019).

Se ha seguido un método similar al propuesto en Catani et al. (2005) y Solari et al. (2020), en el que la vulnerabilidad varía de 0 (sin daño) y 1 (pérdida completa) en función de la intensidad del movimiento del terreno y el probable daño provocado. Se utilizan tres clases de vulnerabilidad determinadas a partir de los tres niveles de daño propuestos por Cardinali et al. (2002) para los elementos en riesgo (Tabla 7).

CLASE DE DAÑO	NIVEL DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO PARA EDIFICACIONES Y CARRETERAS
(S) - Superficial	Estético, menor	La funcionalidad de la no se ve comprometida. Reparación rápida y a bajo coste.
(F) - Funcional	Medio	La funcionalidad está comprometida y el daño requiere de tiempo y grandes recursos para su reparación.
(E) - Estructural	Severo o total	La funcionalidad está severa o completamente dañada y se requiere de una extensa y costosa reparación. Posible demolición y reconstrucción.

Tabla 7. Clases de daños en relación con los niveles de daño esperados en los elementos vulnerables. Fuente: tomado y modificado de Cardinali et al. (2002).

A continuación, se presenta la metodología concreta para el cálculo de la vulnerabilidad física para edificaciones y re de carreteras para el cálculo del riesgo. En función del daño, puede establecerse la pérdida económica, que no es objeto de este artículo.

#### 4.4.2.1. Estimación de la vulnerabilidad para edificaciones

Para el análisis de la vulnerabilidad física se ha asignado un valor de vulnerabilidad a cada edificación en función de su tipología y comportamiento al movimiento. La tipología de edificación es una variable indispensable para el cálculo de la potencial destrucción de las construcciones en riesgo frente a un fenómeno. Por consiguiente, es un parámetro óptimo para determinar la vulnerabilidad física de ésta y puede estimarse a partir de la edad del edificio.

La edad no sólo tiene importancia por su efecto sobre el proceso de deterioro de la resistencia del edificio, sino que es indicativo de las técnicas constructivas, variables a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en algunos estudios se determina que los edificios anteriores a los 50 años son entre 4 y 5 veces más vulnerables y que los edificios de nueva construcción, de pórticos de acero y de hormigón armado, son mucho menos vulnerables (Cochrane y Schaad, 1992).

A partir de los datos del SISMICAT (2003), de la clasificación de Heinimann (1999), y de las sucesivas normativas técnicas estatales (p. ej., el Código Técnico de la Edificación -CTE- y la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación), se presentan las tipologías constructivas y resistencias más habituales (Tabla 8). Como los métodos constructivos son los mismos independientemente del tipo de fenómeno que le afecte (p. ej., deslizamiento, terremoto, etc.) se asumen los mismos períodos para el cálculo de la vulnerabilidad física de edificaciones afectadas por movimientos del terreno. La clasificación de las edificaciones se presenta en clases de vulnerabilidad comprendidas entre la A y la C, de mayor a menor vulnerabilidad (a más edad, mayor vulnerabilidad).

TIPOLOGIA EDIFICACION	PERÍODO (AÑO)	ESTRUCTURA DEL EDIFICIO	RESISTENCIA (a partir de Heinimann, 1999)
A	≤1950	Estructuras ligeras (entibación simple) y mixtas (hormigos y entibación)	Baja a media
B	1951 – 1970	Hormigón y muros de ladrillo	Media
C	>1970	Hormigón y muros de ladrillo / Hormigón armado	Media a alta

Tabla 8. Tipología de edificación asumida según el período de construcción para edificios a partir del Pla d’Emergències de protecció per a risc sísmic a Catalunya (SISMICAT). Además, se clasifican las tipologías de edificación en base a las estructuras predominantes de construcción en cada período (intervalo de años), y a la estimación de su resistencia como tipos de elementos expuestos en base a Heinimann (1999), a la norma MV-201 de 1972 sobre “Obra de Fábrica de Ladrillo” (Ministerio de Vivienda, 1973), a la instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón armado (Ministerio de Obras Públicas, 1973) y a la Ley 38/1999, de Ordenación de la Edificación.

#### 4.4.2.2. Estimación de la vulnerabilidad para la red de carreteras

La vulnerabilidad asociada a las redes de transporte se relaciona con la susceptibilidad de una carretera a que determinados incidentes puedan causar reducciones en los niveles de servicio y en los tiempos de viaje (Berdica, 2002). La clasificación de la red en función de las tipologías de vías (en función de los carriles, diseño geométrico, ancho y relevancia para el territorio) puede emplearse para la determinación de la vulnerabilidad a nivel regional (Toyfur, et al., 2018) y permite tener en consideración aspectos como la pavimentación (Winter et al., 2013).

Existen numerosos tipos de carreteras, sin embargo, algunas referencias bibliográficas aportan sencillas clasificaciones, de cuatro o cinco clases. Así pues, las carreteras en riesgo se han clasificado de acuerdo con una leyenda simple, compuesta por clases, basada en la tipología de la red, determinada a partir de criterios funcionales. Esta agrupación, que tiene en cuenta los criterios de vulnerabilidad, ha sido dividida en un total de siete clases (de A a G), de mayor a menor vulnerabilidad (Tabla 9). Aplicación de la clasificación sobre la base OpenStreetMap® (www.openstreetmap.org -OSM-), con datos abiertos y estandarizados a nivel internacional. En España, OSM contiene datos provenientes del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y del Sistema Cartográfico Nacional (SCNE), licenciados para su reutilización bajo la CC BY 4.0.

TIPOLOGIA CARRETERA	DENOMINACIÓN
A – CM	Autopistas y Autovías
B – CT	Carretera nacional o autonómica básica de primer nivel
C – CP	Carretera autonómica o básica de segundo nivel
D – CS	Carretera autonómica de tercer nivel o comarcal
E – CT/R	Carretera provincial o local + vías de servicio + camino residencial
F – CU/T	Camino
G – CF/S	Vereda

Tabla 9. Categorías de carreteras propuesta para el proyecto Mompa a partir de la tipología. Elaborada en base a los © colaboradores OpenStreetMap y las clasificaciones española y catalana.

Cada clase de carretera tendrá una estimación de vulnerabilidad según el nivel de daño propuesto por Cardinali et al (2002) para el análisis del riesgo a deslizamientos siguiendo un enfoque cualitativo (Tabla 7). A modo de ejemplo, se consideró que la vulnerabilidad era mayor a lo largo de una carretera de alto tránsito (p. ej., tipo A - CM, B) que en una carretera secundaria (p. ej., tipo D - CS).

A partir de la clasificación de Leone et al. (1996), Glade (2003) propuso una clasificación de intensidad de daños para carreteras según el tipo de daño esperado por deslizamientos, hecha a partir de registros históricos, y en cuatro categorías a las que asignó un rango de vulnerabilidad (Tabla 10). La matriz de vulnerabilidad desarrollada por Leone et al. (1996) y Glade (2003) presenta la ventaja de ser fácilmente modificable para su aplicación en diferentes áreas y condiciones.

ELEMENTO EXPUESTO	INTENSIDAD DE DAÑO	TIPO DE DAÑO	RANGO VULNERABILIDAD (0-1)
Carretera	I	Daño pequeño en la carretera.	0,05 – 0,3
	II	Daño en la carretera, para su reparación son necesarias 10 toneladas de m <sup>3</sup> .	0,3 – 0,6
	III	Daño en la carretera, para su reparación son necesarias 100 toneladas de m <sup>3</sup> .	0,5 – 0,8
	IV	Destrucción de la carretera	0,8 - 1

Tabla 10. Vulnerabilidad de carreteras expuestas de acuerdo con el tipo de daños por movimientos del terreno. La intensidad de daño depende de la intensidad del deslizamiento calculada a partir del desplazamiento lateral, ver Leone et al. (1996) para más información. Tomado y modificado de Leone et al. (1996) y Glade (2003).

#### 4.4.3. Determinación del riesgo potencial

Para el cálculo del riesgo potencial se han construido matrices de riesgo que establecen el grado de daño en función de la intensidad del fenómeno y de la vulnerabilidad del elemento expuesto. Los valores se han obtenido de diversas fuentes y aportan un resultado orientativo.

##### 4.4.3.1. Matriz de riesgo en edificaciones

Para el cálculo del riesgo de las edificaciones se ha empleado el período de construcción y la intensidad (peligrosidad) de las ADA. Cada uno de los ítems estimados tiene un peso asignado de acuerdo con el criterio de experto de los autores de la presente investigación empleando técnicas de análisis multicriterio (método heurístico) y de los trabajos previos conocidos (p. ej., Cardinali et al., 2002; Solari et al., 2020). En consecuencia, teniendo en cuenta la escala regional de trabajo, seguimos un método en el que la vulnerabilidad varía entre 0 (sin daño) y 1 (daño total) en función del grado de intensidad del fenómeno se muestra la matriz propuesta (Tabla 11). De la matriz se observa como un deslizamiento de intensidad 1 (I<sub>1</sub>) es capaz de causar daños superficiales a las tres clases de edificios; y, por ejemplo, un deslizamiento de alta intensidad (I<sub>3</sub>) provoca graves daños estructurales en edificaciones construidas antes de 1950 (A), funcionales en las de tipo B, y superficiales en las A.

		TIPOLOGÍA DE EDIFICACIÓN		
		A	B	C
INTENSIDAD ADA	I <sub>1</sub>	0,1 (S)	0,05 (S)	0,01 (S)
	I <sub>2</sub>	0,2 (F)	0,1 (S)	0,05 (S)
	I <sub>3</sub>	0,4 (E)	0,2 (F)	0,1 (S)

Tabla 11. Matriz con el grado de riesgo (o daño) según la tipología constructiva del edificio e intensidad de la ADA.

#### 4.4.3.2. Matriz del riesgo en carreteras

Para el cálculo del riesgo de las carreteras se ha empleado la tipología y la intensidad del movimiento del terreno aportada por las ADA. Cada uno de los valores tiene un peso asignado de acuerdo con el criterio de experto de los autores de la presente investigación (método heurístico) y de los trabajos previos conocidos (p. ej., Cardinali et al., 2002; Solari et al., 2020). Asumiendo la escala regional, la vulnerabilidad varía entre 0 (sin daño) y 1 (daño total) en función de la intensidad del fenómeno. Si la intensidad es igual a cero, la vulnerabilidad es nula. Según la Tabla 12, un deslizamiento de intensidad 1 (I1) solamente es capaz de causar daños superficiales a todos los tipos de carreteras. En cambio, un deslizamiento de alta intensidad (I3) provoca graves daños estructurales en todos los tipos, y funcionales en autopistas y autovías, y carreteras nacionales o autonómicas básica de primer nivel.

		TIPOLOGÍA CARRETERA						
		A - CM	B - CT	C - CP	D - CS	E - CT/R	F - CU/T	G - CF/S
INTENSIDAD ADA	I <sub>1</sub>	0,05 (S)	0,15 (S)	0,25 (S)	0,2 (S)	0,2 (S)	0,2 (S)	0,25 (S)
	I <sub>2</sub>	0,2 (S)	0,25 (S)	0,3 (F)	0,4 (F)	0,5 (F)	0,55 (F)	0,6 (E)
	I <sub>3</sub>	0,4 (F)	0,5 (F)	0,6 (E)	0,7 (E)	0,8 (E)	0,9 (E)	1 (E)

Tabla 12. Matriz con el grado de riesgo (o daño) según la tipología de carretera e intensidad de la ADA.

## 5. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada ha demostrado ser una herramienta muy útil para una primera evaluación del riesgo geológico de los movimientos del terreno detectados por interferometría radar a escala territorial.

La generación de zonas de movimiento partir de los puntos de movimientos o velocidad detectados por la interferometría radas permite focalizar las zonas a evaluar.

El uso de información geológica y morfológica permite, mediante una clasificación semiautomática, una rápida identificación del fenómeno causante del movimiento y asignarle una peligrosidad potencial en función de su intensidad, estimada a partir de la velocidad media.

La utilización, del mapa de cobertura del suelo y posteriormente, de bases topográficas como la BT5M del ICGC o de OpenStreetMap permiten una rápida identificación y valoración los elementos expuestos.

El uso de tablas simplificadas de valoración del riesgo permite establecer un valor cuantitativo indicativo de los posibles daños producidos por la actividad de las zonas de movimiento detectadas. Este cálculo és de carácter regional y fácilmente extrapolable a otras áreas.

## REFERENCIAS

- Agliardi, F., Crosta, G. and Zanchi, A., 2001. Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology*, 59: 83-102.
- Barnolas, A., and Gil-Peña, I., 2001. Estructura secuencial del relleno sedimentario de la Cuenca de antepaís surpirenaica y su relación con la evolución del orógeno. *Geotemas*, 2, 37-41.
- Barra, A., Solari, L., Béjar-Pizarro, M., Monserrat, O.; Bianchini, S.; Herrera, G.; Crosetto, M.; Sarro, R.; González-Alonso, E.; Mateos, R.M.; Ligüerzana, S.; López, C.; Moretti, S. A Methodology to Detect and Update Active Deformation Areas Based on Sentinel-1 SAR Images. *Remote Sens.* 2017, 9, 1002. <https://doi.org/10.3390/rs9101002>
- Berdica, K., 2002. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done, and should be done. *Transport Policy*, 9, 117-127.
- Burbank, D. W., Puigdefàbregas, C. A. I., and Munoz, J. A., 1992. The chronology of the Eocene tectonic and stratigraphic development of the eastern Pyrenean foreland basin, northeast Spain. *Geological Society of*

- America Bulletin*, 104(9), 1101-1120.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., Cacciano, M., Castellani, M., and Salvati, P., 2002. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2, 57–72
- Catani, F., Casagli, N., Ermini, L., Righini, G., and Menduni, G., 2005. Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin. *Landslides*, 2 (4), pp. 329-342.
- Cochrane, S. W., and Schaad, W. H., 1992. Assessment of Earthquake Vulnerability of Buildings. *Proc. 10th WCEE*, Madrid, España, Vol. 1, pp. 497-502.
- Colas B., 2013. Cartographie de l'aléa mouvement de terrain du département des Pyrénées-Orientales – Echelle 1: 50 000. *Rapport final BRGM/RP-62991-FR*, 98 p., 94 ill., 4 ann., 3 cartes hors texte.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J., 1996. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report, (247).
- Glade, T., (2003. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Erde*, 134(2), 123-146.
- Heinimann, H. R., 1999. Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren - Fallbeispiele und Daten. Umwelt-Materialien NR. 107/II. Naturgefahren. Bern, Germany.
- Leone, F., Asté, J. P., and Leroi, E., 1996. Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. *Landslides-Glissements de Terrain*. Balkema, Rotterdam, 263-270.
- Monserrat, O., Barra, A., Herrera, G., Solari, L., González-Alonso, E., Béjar-Pizarro, M., Bianchini, S., Sarro, R., García, A-F., Reichenbach, P., Catani, F. and Crosetto, M. (2019, January). The U-Geohaz project: Sentinel-1 to support geohazards early warning systems and impact assessment. *In Geophysical Research Abstracts* (Vol. 21).
- Navarro, J. A., Cuevas, M., Tomás, R., Barra, A., and Crosetto, M., 2019. Automating the Detection and Classification of Active Deformation Areas—A Sentinel-Based Toolset. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 19, No. 1, p. 15).
- Puigdefàbregas, C., Muñoz, J. A., and Marzo, M., 1986. Thrust belt development in the eastern Pyrenees and related depositional sequences in the southern foreland basin. *Foreland basins*, 229-246.
- Solari, L., Barra, A., Herrera, G., Bianchini, S., Monserrat, O., Béjar-Pizarro, M., Crosetto, M., Sarro, R. and Moretti, S., 2018. Fast detection of ground motions on vulnerable elements using Sentinel-1 InSAR data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 152-174.
- Solari, L., Bianchini, S., Franceschini, R., Barra, A., Monserrat, O., Thuegaz, P., Bertolo, D., Crosetto, M., and Catani, F., 2020. Satellite interferometric data for landslide intensity evaluation in mountain regions. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 87, 102028.
- SISMICAT, 2003. Pla especial d'emergències sísmiques a Catalunya. Annex 6.1. Vulnerabilitat sísmica. Avaluació de la vulnerabilitat dels edificis. Barcelona, Espanya, 45 pp.
- Toyfur, M. F., Pribadi, K. S., Wibowo, S. S., and Sengara, I. W., 2018. Vulnerability factor in earthquake risk assessment model for roads in Indonesia. *In MATEC Web of Conferences* (Vol. 229, p. 03009). EDP Sciences.
- Winter, M. G., Smith, J. T., Fotopoulou, S., Ptilakis, K., Mavrouli, O., Corominas, J., and Argyroudou, S., 2014. An expert judgement approach to determining the physical vulnerability of roads to debris flow. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 291-305.