

Deliverable E 2.2.1: Informe técnico sobre la vulnerabilidad a los movimientos de ladera

A deliverable of GT2: Cartografía de riesgos para la ordenación del territorio y la protección civil

Activity 2.2: Evaluación de la exposición y la vulnerabilidad

Due date of deliverable: 30/09/2020

Actual submission date: 28/02/2022

Lead contractor for this deliverable: IGOT-ULISBOA

Autores

José Luís Zêzere, Ricardo Garcia, Sérgio Cruz Oliveira, Susana Pereira, Raquel Melo, Eusébio Reis, Pedro Pinto Santos, Rita Morais



ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	3
2 METODOLOGÍA.....	5
2.1 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SOCIAL EN EL MUNICIPIO DE SETÚBAL	5
2.1.1 <i>Dados de entrada no modelo de avaliação da vulnerabilidade social</i>	7
2.1.1.1 Críticidad	7
2.1.1.2 Capacidad de soporte	9
2.2 PROCEDIMIENTO ESTADÍSTICO PARA CALCULAR LA CRITICIDAD, LA CAPACIDAD DE SUPORTE Y LA VULNERABILIDAD SOCIAL	12
2.3 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA DE LOS EDIFICIOS DEL MUNICIPIO DE SETÚBAL	14
2.3.1 <i>Datos de entrada en la evaluación de la vulnerabilidad física de los edificios.....</i>	15
2.3.1.1 Inventario de los daños causados a los edificios por movimientos de ladera	15
2.3.1.2 Edificios expuestos a la inestabilidad de los taludes.....	16
2.3.1.3 Vulnerabilidad física de los edificios a los movimientos de tierra	18
2.4 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA DE LAS CARRETERAS DEL MUNICIPIO DE ARRUDA DOS VINHOS 21	
2.4.1 <i>Datos de entrada para evaluar la vulnerabilidad física de las carreteras.....</i>	21
2.4.1.1 Inventario de los movimientos de ladera e inventario de los daños causados por los movimientos de ladera en las carreteras	21
2.4.1.2 Carreteras expuestas a la inestabilidad de los taludes	25
2.4.1.3 Vulnerabilidad física de las carreteras	27
3 RESULTADOS	33
3.1 VULNERABILIDAD SOCIAL EN EL MUNICIPIO DE SETÚBAL.....	33
3.1.1 <i>Críticidad</i>	33
3.1.2 <i>Capacidad de soporte.....</i>	38
3.1.3 <i>Valor final de la vulnerabilidad social</i>	43
3.1.4 <i>Recomendaciones finales</i>	44
3.2 VULNERABILIDADE FÍSICA DE LOS EDIFICIOS DEL MUNICIPIO DE SETÚBAL.....	45
3.2.1 <i>Características de los edificios expuestos a movimientos de ladera</i>	45
3.2.2 <i>Vulnerabilidad física de los edificios expuestos a movimientos de ladera</i>	47
3.2.3 <i>Vulnerabilidad física de las carreteras del municipio de Arruda dos Vinhos.....</i>	49
3.2.3.1 Características de las carreteras expuestas a movimientos de ladera.....	49
3.2.4 <i>Vulnerabilidad física de las carreteras expuestas a movimientos de ladera.....</i>	53
4 CONCLUSIONES.....	58
5 BIBLIOGRAFÍA	60

1 INTRODUCCIÓN

El GT2 se basa en el desarrollo de herramientas cartográficas de prevención de riesgos para su aplicación en la ordenación del territorio y la planificación de emergencias. Las principales herramientas a desarrollar incluyen la creación y actualización de la cartografía de peligrosidad, exposición, vulnerabilidad y riesgo asociada a las regiones costeras del SUDOE, adaptada a los diferentes escenarios futuros de riesgo previstos por el cambio climático.

La Actividad 2.2 - Evaluación de la exposición y la vulnerabilidad, del GT2 del proyecto RISKCOAST se basa en la exploración de los datos censales disponibles y en la información geográfica de varias tipologías, que apoyan la caracterización de los elementos expuestos. La evaluación de la vulnerabilidad física de los edificios expuestos a los movimientos de ladera y de la vulnerabilidad social de las personas y comunidades para el municipio de Setúbal; y de la vulnerabilidad física de las carreteras expuestas a los movimientos de ladera, en este caso en el municipio de Arruda dos Vinhos, constituye una herramienta fundamental para la gestión de riesgos.

La utilidad de los estudios de vulnerabilidad se refleja en dos niveles de actuación: en el apoyo a la planificación de la protección civil de emergencia para las fases de inminencia, ocurrencia y recuperación posterior a la catástrofe; para la planificación de la gestión de riesgos a medio y largo plazo, identificando y comprendiendo los factores que explican la propensión a los daños en los edificios, las carreteras y la población, definiendo las prioridades de asignación de recursos y de prevención y preparación en las fases ex ante de las catástrofes.

El objetivo principal del presente informe técnico (E.2.2.1) es caracterizar la vulnerabilidad física de las edificaciones a los movimientos de ladera y la vulnerabilidad social de las comunidades en la zona de estudio del municipio de Setúbal (*Figura 1*), así como la vulnerabilidad física de la red viaria a los movimientos de ladera en el municipio de Arruda dos Vinhos. No obstante, las evaluaciones realizadas pueden ser útiles en la valoración de la propensión a los daños de otros peligros, dada la transversalidad de los parámetros utilizados, por ejemplo, el estado de conservación, el número de plantas o la antigüedad en el caso de los edificios; y en el caso de las

carreteras, por ejemplo, la tipología de la vía, la deformación vertical, la deformación horizontal.

Para evaluar la vulnerabilidad social de las comunidades, se adoptó una metodología que considera los componentes de criticidad (en relación con los individuos) y capacidad de soporte (en relación con las características geográficas que pueden proporcionar un mayor soporte durante y después de los eventos desastrosos), y que consiste en una metodología multirriesgo, es decir, no específica para un tipo de peligro en particular.

El GT2 está coordinado por el equipo IGOT-ULISBOA que establece los procedimientos metodológicos para la producción de herramientas cartográficas de prevención de riesgos. La aplicación de estas metodologías a las diferentes áreas de estudio será desarrollada por cada uno de los beneficiarios participantes en el GT2. El equipo del IGOT-ULISBOA asegura a cada uno de los beneficiarios el apoyo técnico necesario para la aplicación de las metodologías propuestas.

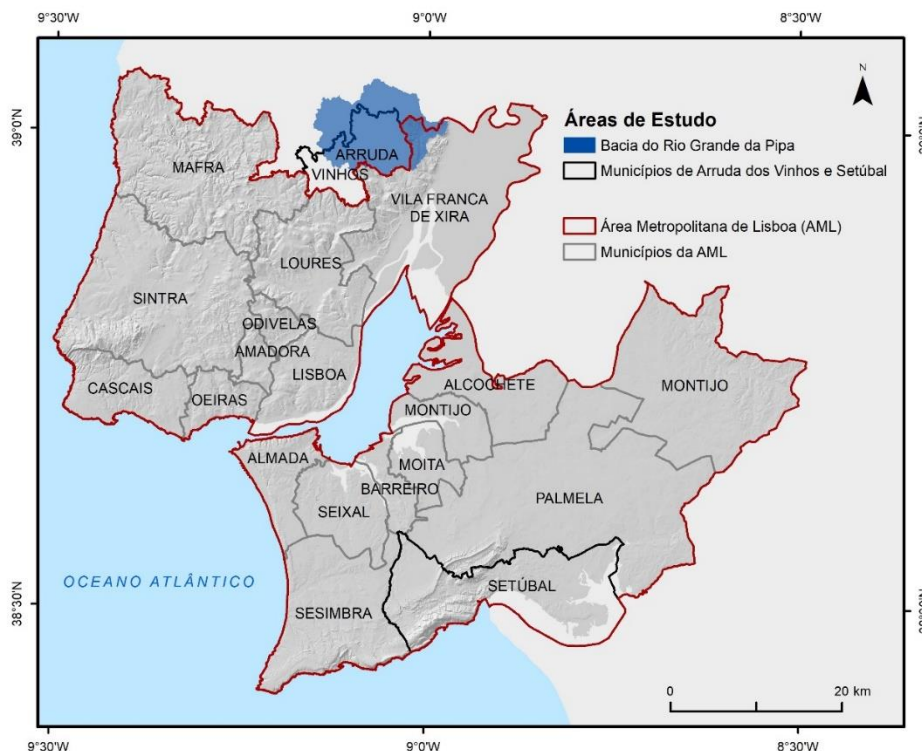


Figura 1 – Entorno geográfico de las zonas de estudio utilizadas en la evaluación de la vulnerabilidad social y la vulnerabilidad física de los edificios y las carreteras a los movimientos de ladera

2 METODOLOGÍA

2.1 Evaluación de la vulnerabilidad social en el municipio de Setúbal

La vulnerabilidad social (VS) es un indicador clave para la gobernanza del riesgo, que involucra los procesos e impactos resultantes de eventos de origen natural, tecnológico o ambiental. La relevancia del análisis de la vulnerabilidad social a nivel sub-municipal surge de la necesidad instrumental de apoyar las opciones políticas traducidas en medidas estratégicas y operativas en el contexto de la prevención, reducción, mitigación y adaptación del riesgo, así como de la necesidad de consolidar los indicadores de capacidad de soporte y resiliencia individual y comunitaria. De este modo, responde a las necesidades en ámbitos como la protección civil y la gestión de emergencias, las políticas sociales, sanitarias y educativas, y contribuye a los marcos de referencia de la planificación urbana y territorial.

La metodología de evaluación de la vulnerabilidad social aplicada al municipio de Setúbal está respaldada por referencias científicas internacionales y ha sido previamente validada y aplicada en Portugal continental (Mendes et al., 2010). A nivel inframunicipal, esta metodología de evaluación de la VS se ha aplicado en varios contextos geográficos como el proyecto "Prevención y Gestión de Riesgos Naturales en el Municipio de Alvaiázere" (Tavares y Santos, 2013), así como en los municipios de Cascais y Lagos (Mendes, Tavares y Santos, 2019), y en Câmara de Lobos.

La evaluación de la VS en el municipio de Setúbal se enmarca en un estudio a nivel del Área Metropolitana de Lisboa (AML), lo que confiere mayor robustez y confianza a los resultados, permitiendo el encuadramiento y la comparabilidad de los índices obtenidos con el área circundante, que incluye tanto territorios fuertemente urbanizados como altamente rurales. Con el fin de proporcionar un nivel de conocimiento de los SV que responda a los requerimientos de una gestión y planificación de emergencias más eficiente, se adoptó la sección estadística como unidad territorial de análisis, tal y como se define en la Base Geográfica de Referencia de la Información (BGRI) del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2011). La adopción de una unidad de análisis inframunicipal detallada plantea algunos retos metodológicos relativos a la definición de las variables que se utilizarán en el modelo; la adquisición, preparación e integración de los datos relacionados con las variables definidas; y la interpretación y aplicabilidad

de los resultados. En cuanto a la escala, sirvieron de fuente las consideraciones de Schmidtlein et al. (2008) sobre la aplicación del índice SoVI® - Social Vulnerability Index (Cutter et al., 2003) en diferentes contextos geográficos. Los autores concluyen que, aunque los cambios de escala afectan a las propiedades numéricas del índice, no se observa lo mismo con respecto a las variables que determinan los niveles de vulnerabilidad social. Chen et al. (2013) y Zhou et al. (2014), en estudios de aplicación del SoVI® en la República Popular China destacan que la selección de variables no puede ser indiferente a la escala de análisis y al contexto geográfico del área de estudio, consideración que resultó crucial para el presente trabajo.

Como se ha mencionado, el modelo de VS adoptado basa la evaluación en dos componentes: la criticidad y la capacidad de soporte.

La criticidad se define por el conjunto de características y comportamientos de los individuos que condicionan su propensión a sufrir daños tras la ocurrencia de un evento desastroso. Estas características pueden contribuir a la ruptura del sistema y de los recursos de las comunidades que les permiten responder o hacer frente a escenarios catastróficos. En función de la mayor o menor disponibilidad de información, las variables que se incluyan en la evaluación de la criticidad deberán representar los siguientes ámbitos: demografía, seguridad social, estado del patrimonio construido, economía, educación, vivienda, estructura familiar, empleo y salud. La escala de análisis potencia y condiciona el tipo de variables a incluir.

La capacidad de soporte se define por el conjunto de infraestructuras territoriales que permiten a la comunidad reaccionar en caso de desastre o catástrofe. Los ámbitos expresivos básicos de la capacidad de soporte son: la economía, la capacidad de alojamiento, la capacidad de movilidad, la proximidad a las infraestructuras sociales, sanitarias y de protección civil y el acceso a las necesidades básicas. Pueden considerarse otros ámbitos, dada la especificidad de la información disponible.

La magnitud de los daños -por ejemplo, el número de muertes o el número de días con movilidad restringida- dependerá de la capacidad de soporte del territorio. Así, una alta capacidad de soporte puede constituir un contrapunto a un alto nivel de criticidad. La ubicación y la densidad de las infraestructuras son un reflejo de la forma en que está estructurada la sociedad. Mientras que para una población con una alta capacidad de soporte un determinado evento

dañino puede adquirir sólo características fortuitas - ya que dispone de capacidades y recursos suficientes para poder restaurar con mayor o menor facilidad las pérdidas y daños sufridos -, en el caso de una población enmarcada en un territorio con baja capacidad de soporte, ese mismo evento puede suponer el agravamiento de las fragilidades existentes, dando lugar a situaciones de grave perturbación de las funciones socioeconómicas cotidianas.

2.1.1 Datos de entrada no modelo de avaliação da vulnerabilidade social

Para evaluar la VS en el municipio de Setúbal, se consideraron todas las secciones estadísticas de AML, según los datos del Censo 2011 disponibles para ese nivel de desagregación de la información.

De hecho, la aplicación más robusta de la metodología requiere la existencia de un gran número de individuos estadísticos, y sería insuficiente considerar sólo las 192 secciones estadísticas distribuidas en las 5 parroquias (8 en 2011) que componen el municipio de Setúbal, al igual que sería insuficiente utilizar las 183 parroquias que componen AML en la fecha de los Censos de 2011. Para AML, el universo considerado se compone, pues, de 4.521 secciones estadísticas, en las que vivían 2.821.876 habitantes en 2011. Cada sección estadística del AML tiene una superficie media de 0,64 km² y una población residente de 624 personas. En el municipio de Setúbal la media de población por sección estadística es de 631 habitantes y la media de superficie es de 0,94 km². No hay secciones estadísticas sin residentes. Estos valores significan que, al tener un área media mayor que el área media de las secciones estadísticas del AML, la evaluación de la VS en el municipio de Setúbal no pierde detalle. En el mismo sentido, la media de población residente por sección estadística en Setúbal está muy cerca de la media en AML (donde se observa una desviación estándar de 210 residentes).

2.1.1.1 Criticidad

A partir de los datos del Censo de 2011 para el nivel de desagregación de la sección estadística, fue posible definir un conjunto inicial de 45 variables, de las que se eliminaron la densidad de población y la densidad de edificios, ya que reflejan la exposición y no la vulnerabilidad, quedando un total de 43

variables (Tabla 1). Para garantizar la comparación entre unidades territoriales de análisis, la mayoría de los datos variables se expresan en forma de proporción.

Tabla 1 – Lista de variables consideradas inicialmente para la evaluación de la criticidad en el Área Metropolitana de Lisboa

Código	Denominación de la variable
Alo_fa_vag	Proporción de viviendas vacantes (%)
AlFamSagua	Proporción de viviendas sin agua corriente (%)
AlFamSesgo	Proporción de viviendas de residencia habitual sem sistema de esgotos (%)
AlojArrend	Proporción de viviendas de residencia habitual arrendados (%)
Al_1_2div	Proporción de viviendas de residencia habitual com 1 ou 2 divisões (%)
Al_5maisDi	Proporción de viviendas de residencia habitual com 5 ou mais divisões (%)
Al_ate50m2	Proporción de viviendas de residencia habitual com área até 50 m ² (%)
Almais200m	Proporción de viviendas de residencia habitual com área maior que 200 m ² (%)
Almais100m	Proporción de viviendas de residencia habitual com mais de 100 m ² (%)
Al_c_banho	Proporción de viviendas de residencia habitual com banho (%)
Alo_oc_pro	Proporción de viviendas de residencia habitual com proprietário ocupante (%)
Ed_ate1970	Proporción de edificios construídos antes de 1970 (%)
Ed_12pisos	Proporción de edificios com 1 ou 2 pisos (%)
Ed_5mai_pi	Proporción de edificios com 5 ou mais pisos (%)
Ed_betao	Proporción de edificios com estrutura de betão armado (%)
Ed_pedra	Proporción de edificios com estrutura de paredes de adobe ou alvenaria de pedra solta (%)
In_freq_bas	Proporción de individuos a frequentar o ensino básico (%)
In_est_mun	Proporción de individuos residentes a estudarem no município de residencia (%)
In_1bas_co	Proporción de individuos residentes con el 1º ciclo do ensino básico completo (%)
In_sup_co	Proporción de individuos residentes con curso superior completo (%)
In_ao_ler	Proporción de individuos residentes sin saber ler nem escrever (%)
In_emp_1ar	Proporción de población empleada en el sector primário (%)
In_emp_2ar	Proporción de población empregada no sector secundário (%)
In_emp_3ar	Proporción de población empregada no sector terciário (%)
In_desemp	Proporción de población com idade entre 25 e 64 anos desempregada à procura de novo emprego ou à procura de primeiro emprego (%)
In_emprega	Proporción de población com idade entre 25 e 64 anos empregada (%)
In_tra_mun	Proporción de individuos residentes a trabalharem no município de residencia (%)
In_et_mun	Proporción de individuos residentes a estudarem e trabalharem no município de residencia (%)
In_s_activ	Proporción de individuos residentes sem atividade económica (%)
In_et_outro	Proporção da população residente que trabalha ou estuda que o faz noutro município (%)
Fa_dim_med	Dimensão média das famílias clássicas (N.º de indivíduos)
Fa_c_5mais	Proporción de famílias clássicas com 5 ou mais pessoas (%)
Fa_c_1ou2p	Proporción de famílias clássicas com 1 ou 2 pessoas (%)
Fa_c_ind65	Proporción de famílias clássicas com pessoas com 65 ou mais anos (%)

Código	Denominación de la variable
Fa_s_desem	Proporción de familias clásicas sem desempleados (%)
Nu_c_fil15	Proporción o de núcleos familiares c/ filhos c/ menos de 15 anos (%)
Pop_0_4	Proporción residente com menos de 5 anos (%)
Pop_15_24	Proporción residente com edad entre 15 e 24 anos (%)
Pop_65mais	Proporción o residente com edad igual ou superior a 65 anos (%)
Ind_p_aloj	Individuos por alojamiento familiar clásico de residencia habitual (N.º)
Rel_Mascul	Relación de masculinidad
PensReform	Proporción de individuos residentes pensionistas ou reformados (%)
Pop_femi	Proporción de población feminina no total de población residente (%)

2.1.1.2 Capacidad de soporte

Para la evaluación de la capacidad de soporte se consideraron 9 variables (Tabla 2).

Tabla 2 – Lista de variables consideradas inicialmente para la evaluación de la capacidad de soporte en el Área Metropolitana de Lisboa

Código	Denominación de la variable
N_unidAlo	Cobertura de los establecimientos hoteleros para el alojamiento temporário
BOMBEInear	Cobertura de los parques de bomberos
FARMACnear	Cobertura de las farmacias
RV34_near	Cobertura de la red estructural de carreteras
CSAUDEnear	Cobertura por los centros de salud
HOSPnear	Cobertura por hospitales
COMBUSTnear	Cobertura por gasolineras
PSPGNRnear	Cobertura por comisarías de policía PSP/GNR
BAclass2	Cobertura por los principales puntos de venta de alimentos

Debido a su naturaleza, las variables en las que se basa la evaluación de la capacidad de soporte requieren un mayor esfuerzo de recogida de información y de preprocesamiento hasta obtener la variable que represente adecuadamente la cobertura de los distintos tipos de equipos e infraestructuras.

La cobertura de los establecimientos de alojamiento temporal se basó en la información disponible en el sitio SIGTUR (<https://sigtur.turismodeportugal.pt/>) gestionado por la Autoridad de Turismo de Portugal, y del que es posible extraer, tras la geocodificación, la localización de todos los complejos turísticos (412) situados en el AML.

Dado el valor de la información, se utilizó el campo que cuantifica el número de unidades de alojamiento por estación -para diferenciar el tamaño de las estaciones- y para calcular el número total de unidades de alojamiento existentes en el radio de 3 km alrededor de cada sección estadística.

Para evaluar la cobertura de los parques de bomberos se utilizó la información disponible en el Open Street Map, complementada con la investigación, verificación y, en su caso, corrección de la ubicación o eliminación mediante los datos del servicio Google Maps. Hemos considerado los parques de bomberos situados fuera del AML, en un radio de 7 km. Se identificaron y georreferenciaron un total de 88 parques de bomberos. Tras varias experiencias de representación de la cobertura, se decidió utilizar el método de la distancia mínima desde el centroide de la sección estadística hasta el equipo más cercano.

El portal SIG del INFARMED (<https://www.infarmed.pt/web/infarmed/entidades/>) permitió exportar la información en formato de hoja de cálculo y geocodificar las 818 farmacias existentes en el AML en un radio de 7 km desde sus límites. Tras confirmar municipio por municipio, aproximadamente el 90% de las farmacias estaban correctamente georreferenciadas, y las restantes fueron corregidas. Al igual que para la variable anterior, se calculó la distancia mínima de cada farmacia al centroide de la sección estadística.

Para la evaluación de la cobertura de la red vial estructurante, las clases funcionales se extrajeron de la base de datos Open Street Map (campo *fclass*) siguientes: 'motorway', 'motorway_link', 'primary', 'primary_link', 'secondary', 'secondary_link', 'trunk' e 'trunk_link', que se considera que representan la red vial estructurante. De hecho, a esta escala de análisis, el simple hecho de tener en cuenta la densidad de la red total de carreteras no define correctamente la movilidad que permite la red. Se identificaron y clasificaron los nodos de la red de carreteras que conectan las principales carreteras estructurantes entre sí (clase 4) y los que conectan las carreteras estructurantes más pequeñas con las anteriores (clase 3) para evaluar la facilidad de acceso de cada sección estadística a la red de carreteras estructurantes, calculando la distancia entre el centroide de la sección y el nodo más cercano.

La cobertura de los centros de salud representa la distancia mínima entre el centroide de cada sección estadística y el centro más cercano,

considerando, sin embargo, un radio de 30 km más allá de los límites de la AML, dada la relevancia y especificidad de los centros de salud. Las fuentes de datos utilizadas fueron el Open Street Map y el portal GeoSaude de la DGS (<http://www.geosaude.dgs.pt/websig/>). Además, se verificó la existencia o la correcta ubicación de estas instalaciones municipio por municipio, y se recogió un total de 120 centros de salud.

Para la cobertura hospitalaria, la metodología fue idéntica a la seguida para los centros de salud, habiéndose georreferenciado 34 hospitales.

La caracterización de la cobertura de las gasolineras se basó en los datos del portal oficial "Precios de los combustibles en línea" de la Dirección General de Energía y Geología (<https://precoscombustiveis.dgeg.gov.pt/>), del que se extrajeron todas las gasolineras en formato CSV, independientemente del tipo de combustible, para los distritos de Lisboa, Setúbal, Santarém y Évora, dada la necesidad de considerar las estaciones situadas en las proximidades de los límites de la AML. Se georreferenciaron un total de 636 gasolineras, que posteriormente fueron objeto de verificación y, en su caso, de corrección de su ubicación o eliminación. Tras experimentar con diversas formas de representación geográfica de la cobertura a la sección estadística, se decidió considerar también la distancia mínima.

Para la caracterización de la cobertura de las estaciones de la Policía de Seguridad Pública (PSP) y de los puestos y destacamentos territoriales de la Guardia Nacional Republicana (GNR), se identificaron 141 instalaciones a partir de las siguientes fuentes: Open Street Map; el servicio ArcGIS Online de PSP (<https://sgmai.maps.arcgis.com/>); el sitio web de la GNR para buscar puestos y destacamentos (https://www.gnr.pt/MVC_GNR/UnEnderecos/); y Google Maps. Los mismos elementos se validaron de forma cruzada, lo que dio mayor credibilidad a las fuentes oficiales de los dos organismos de seguridad pública considerados. Por último, se calculó la distancia mínima al centroide de la sección estadística.

La cobertura de los principales establecimientos alimentarios se evaluó utilizando datos de Open Street Maps, datos proporcionados por los municipios y Google Maps. Se consideraron los establecimientos situados en la AML y en un radio de 7 km más allá de sus límites. Partiendo de un inventario inicial de 2166 establecimientos (que van desde el pequeño comercio de alimentación hasta los grandes centros comerciales), sólo se seleccionaron los principales establecimientos (centros comerciales,

hipermercados, mercados municipales y supermercados), que suman 835. Sin embargo, sólo había 1.331 establecimientos de menor tamaño, lo que pone de manifiesto que estos establecimientos de menor tamaño no estaban debidamente inventariados en algunas zonas del AML, lo que hacía inviable su utilización. Una vez cerrado el inventario y verificado manualmente municipio por municipio, se calculó la distancia mínima entre el centroide de la sección y el establecimiento más cercano.

2.2 Procedimiento estadístico para calcular la criticidad, la capacidad de soporte y la vulnerabilidad social

Tras la recogida e integración de datos descrita en el apartado anterior, sigue una secuencia de procedimientos que incluye la selección final de las variables que se utilizarán como datos de entrada en el Análisis de Componentes Principales (ACP), y sus procedimientos propios. La secuencia de procedimientos se aplica por separado para la criticidad y la capacidad de soporte, según los pasos que se detallan a continuación:

1. Normalización de los valores de las variables a las llamadas puntuaciones z , cuya media es cero y la desviación estándar es 1;
2. Cálculo y análisis de la matriz de correlación de Pearson, para excluir del universo analizado las variables que presentan multicolinealidad. Entre los pares de variables que presentan valores de correlación superiores a 0,7, se elige una u otra variable, según el criterio de mayor relevancia y claridad de significado, en cuanto a la interpretación de su papel en la vulnerabilidad social;
3. Ejecución iterativa del ACP con rotación varimax con valores normalizados y evaluación de la adecuación de los datos mediante el análisis de los parámetros tasa de varianza (debe ser superior al 60%) y medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de la muestra (KMO) (debe ser superior a 0,6), con exclusión de las variables que reducen la robustez del conjunto de datos;
4. Ejecución final del PCA;
5. Extracción del número de componentes que representan la criticidad y la capacidad de soporte. Los componentes principales seleccionados son

los que presentan un total de valores iniciales de Eingen iguales o superiores a 1;

6. Interpretación de la cardinalidad, o "signo", de cada componente. A partir de la ejecución de la matriz de componentes, se identifican las variables que presentan una carga superior al módulo 0,5. Estas variables se interpretan para verificar si la cardinalidad resultante del ACP contribuye a aumentar o disminuir la criticidad y la capacidad de soporte. Se asigna un signo positivo cuando el componente en cuestión aumenta la criticidad o la capacidad de soporte, y un signo negativo en la situación inversa;

7. Cálculo de la puntuación para cada unidad territorial de análisis, es decir, la sección estadística. El cálculo se realiza por simple suma algebraica de la puntuación extraída en cada componente principal, según la cardinalidad atribuida, y con atribución de ponderaciones, según el % de varianza explicada de cada componente

8. Aplicación de una transformación lineal por el método del mínimo-máximo a las puntuaciones de criticidad y apoyabilidad, de forma que la amplitud de los valores esté entre 0 y 1.

Tras la operación descrita en el punto 8, se completan los procedimientos aplicados por separado para la criticidad y la capacidad de soporte.

A continuación, las puntuaciones obtenidas en cada uno de estos componentes se relacionan según la ecuación descrita a continuación, para obtener la puntuación de vulnerabilidad social de cada uno de los 4521 tramos estadísticos:

$$VS = Crit * (1 - CS) \quad (1)$$

donde: *VS* = Vulnerabilidad Social; *Crit* = Criticidad; y *CS* = Capacidad de Soporte.

La sustracción de la capacidad de soporte del valor de 1 se debe a que este componente de la vulnerabilidad social actúa como un factor atenuante, es decir, en sentido contrario a la criticidad.

Posteriormente, los datos alfanuméricos se vinculan a las respectivas entidades geográficas, es decir, las puntuaciones calculadas y presentes en las hojas de cálculo se conectan a través del código de la sección estadística - un identificador único de 9 dígitos definido en el BGRI - con el respectivo

polígono existente en estructura vectorial, en shapefile. Esta operación se realiza en un entorno GIS.

Por último, y también en entorno SIG, se cartografía la vulnerabilidad social y sus componentes de criticidad y capacidad de soporte. Según la metodología propuesta para el índice SoVI[®], y presentada en varios trabajos posteriores de sus autores, la clasificación de las puntuaciones se realiza según la desviación estándar en cinco clases: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta.

2.3 Evaluación de la vulnerabilidad física de los edificios del municipio de Setúbal

La vulnerabilidad física puede definirse como el grado de pérdida de un elemento o conjunto de elementos en riesgo resultante de la ocurrencia de un fenómeno natural potencialmente destructivo de una magnitud determinada, expresado en una escala que va de 0 (ninguna pérdida) a 1 (pérdida total del elemento) (por ejemplo, Fell & Hartford, 1997; Leóne, 1996), o alternativamente por el porcentaje del valor de reconstrucción del elemento afectado (Buckle et al., 2000).

En la evaluación de la vulnerabilidad física a los movimientos del talud se tienen en cuenta la magnitud del movimiento del talud (volumen y velocidad) y la resistencia del elemento expuesto. En el caso de los edificios, se evalúan los tipos de estructura morfológica y resistencia estructural y el estado de mantenimiento del edificio.

En este trabajo se evalúa específicamente la vulnerabilidad física de los edificios frente a los movimientos de ladera, basándose en los siguientes supuestos (Alexander, 2004; Ciurean et al., 2013; Uzielli et al., 2014; Oliveira et al., 2016; Alves, 2018):

(i) el nivel de los daños depende de la tipología y la magnitud del movimiento de masas en los taludes;

(ii) el nivel de daño estructural o no estructural depende en gran medida de la resistencia del elemento afectado;

(iii) la posición del elemento afectado dentro de la masa inestabilizada condiciona el potencial de vulnerabilidad;

(iv) el nivel de daño puede referenciarse cualitativa o cuantitativamente para la determinación de los patrones de deformación.

Los movimientos de ladera pueden afectar a los elementos expuestos de forma compleja (por ejemplo, Oliveira et al., 2016) e incluso dada la limitación ejercida por la resistencia estructural del elemento afectado, el grado de pérdida no es independiente de la posición de la estructura/infraestructura con respecto al movimiento de masas en los taludes (Léone, 2007).

En este trabajo se evalúa la vulnerabilidad física de los edificios potencialmente situados (i) en la zona de ruptura y (ii) en la zona de deposición de un deslizamiento. La cuantificación de la vulnerabilidad depende de las características del elemento expuesto, del tipo de movimiento y de los esfuerzos mecánicos que lo afectan (Uzielli et al., 2008; Silva y Pereira, 2014). La vulnerabilidad de los elementos expuestos, además de la influencia de la intensidad (o magnitud) del movimiento de la masa en los taludes, también está influenciada por los siguientes factores (Léone, 1996; Léone et al., 1996; Lateltin et al., 2005; Papathoma-Köhle et al., 2007): tamaño u otras características geométricas (forma, área, espesor, volumen); factores cinéticos (velocidad, aceleración del flujo); y otros factores (densidad de la masa deslizante, viscosidad).

2.3.1 Datos de entrada en la evaluación de la vulnerabilidad física de los edificios

2.3.1.1 Inventario de los daños causados a los edificios por movimientos de ladera

A pesar de la existencia de un inventario de movimientos de ladera para el municipio de Setúbal, no existe un registro sistemático de los daños causados a los edificios por los movimientos de ladera. Así, fue necesario utilizar un enfoque semicualitativo, en el que se asignan valores de vulnerabilidad, apoyados en parámetros o umbrales obtenidos empíricamente (Uzieli et al., 2008, Guillard-Gonçalves et al., 2016, Alves, 2018, Pereira et al., 2020).

2.3.1.2 Edificios expuestos a la inestabilidad de los taludes

En este trabajo se utilizó la Base de Datos de Edificios Georreferenciados para seleccionar únicamente los edificios situados en zonas de alta y muy alta susceptibilidad a los movimientos de ladera en el municipio de Setúbal.

La susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de ladera se evaluó mediante un método estadístico bivariado de base bayesiana: el Valor Informativo (VI), utilizando como factores condicionantes la pendiente, la exposición de la ladera, la geología, la curvatura de la ladera (perfil transversal), el uso y ocupación del suelo, el índice de posición topográfica y el índice de humedad topográfica. Como variable dependiente se utilizó un inventario de movimientos de ladera que contabiliza 4.047 ocurrencias (principalmente deslizamientos y escorrentías) identificadas en 19 municipios de la región de Lisboa y el Valle del Tajo, incluyendo Setúbal.

Los movimientos de la pendiente se cruzaron con los factores de predisposición a la inestabilidad de la pendiente clasificados y el peso de las clases de cada factor se estableció utilizando la primera ecuación del Método del Valor Informativo (Yin y Yan, 1988; Zêzere, 2002) (ecuación 2):

$$I_i = \ln \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (2)$$

donde: I_i - Valor informativo de la variable i ; S_i - Número de unidades de terreno (celda con 10 m de resolución) con movimientos de pendiente y con presencia de la variable X_i (clase de factor condicionante y); N_i - Número de unidades de terreno con presencia de la variable X_i ; S - Número total de unidades de terreno con movimientos de pendiente; y N - Número total de unidades de terreno del área de estudio.

El VI total de una unidad de terreno j (celda con 10 m de resolución) se determina mediante la segunda ecuación del Método del Valor Informativo (Yin y Yan, 1988; Zêzere, 2002) (ecuación 3):

$$I_j = \sum_{i=1}^m X_{ji} I_i \quad (3)$$

donde: I_j - Valor informativo total en la unidad de parcela j (celda); n - Número de variables; X_{ji} - 1 si la clase de variable está presente en la unidad de parcela j (celda); 0 si la clase de variable no está presente.

El modelo de susceptibilidad al movimiento de la pendiente se validó utilizando la curva de éxito y calculando el AAC (Área bajo la curva = 0,92).

El mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de ladera contempla 5 clases (muy alta, alta, moderada, baja y muy baja), definidas en base al porcentaje de área de deslizamiento acumulado: 50%, 70%, 90%, 95%, 100%, respectivamente.

Con el fin de delimitar las zonas actualmente sujetas al peligro de inestabilidad de los taludes, se seleccionaron y agregaron las clases de susceptibilidad alta y muy alta, que en conjunto validan el 70% del inventario de movimientos de ladera.

Las áreas actualmente sujetas a mayor peligro de inestabilidad de laderas ocupan el 11,7% del territorio del municipio de Setúbal, concentrándose en las parroquias situadas en la parte occidental del municipio (Figura 2). La parroquia de Azeitão (São Lourenço y São Simão) incluye el 56,2% de estas áreas susceptibles, seguida de las parroquias de São Julião, N. S. da Anunciada y Sta. Maria da Graça con el 43,8% de las áreas susceptibles de inestabilidad de laderas. En las restantes parroquias del municipio de Setúbal el peligro de inestabilidad de las laderas es residual o inexistente.

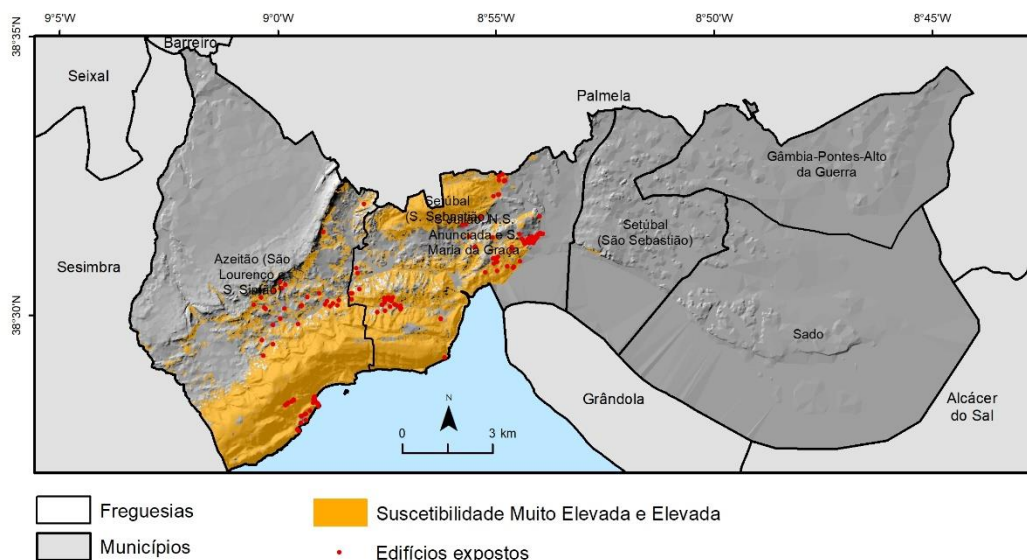


Figura 2 – Áreas susceptibles de inestabilidad de laderas en el municipio de Setúbal

Los movimientos de ladera localizados en el municipio de Setúbal son en su mayoría desprendimientos (92,7%) de pequeño tamaño con una superficie media de 3493 m².

2.3.1.3 Vulnerabilidad física de los edificios a los movimientos de tierra

Se evaluó la vulnerabilidad física de cada edificio residencial expuesto al peligro de movimiento de ladera, a partir de un cuestionario aplicado a expertos en inestabilidad de laderas y con conocimiento del terreno (Guillard-Gonçalves et al., 2016) sobre los daños generados en edificios construidos en AML. También se consideraron los antecedentes de daños en las edificaciones causados por movimientos de ladera en el pasado en el AML (Alves, 2018).

Un edificio puede sufrir el impacto de los movimientos de ladera y los daños pueden ser tanto funcionales como estéticos, y están en función de su intensidad (Uzielli et al., 2008), la velocidad de desplazamiento de la masa inestabilizada (Jakob et al., 2012; Sterlacchini et al., 2014) o la acumulación de material (Oliveira et al., 2016).

En la definición de la vulnerabilidad física de los edificios, se consideraron dos escenarios, basados en la tipología de movimientos de ladera más frecuentes en el municipio de Setúbal y en sus características morfométricas (área, volumen, longitud máxima, profundidad de la superficie de ruptura): (i) 1 m de profundidad de la superficie de ruptura (ubicación en la cicatriz del desprendimiento); (ii) 0,5 m de altura del material acumulado (ubicación al pie del desprendimiento).

La evaluación de la vulnerabilidad física del edificio tuvo en cuenta las siguientes variables sobre las características del edificio (Tabla 3): material de construcción (MC), estructura reforzada (ER), número de plantas (NP), estado de conservación (EC), necesidades de reparación de la estructura (NRE) y necesidades de reparación del revestimiento (NRR). Cada variable que caracteriza a los edificios se divide en un conjunto de clases, obtenidas a partir del BGE, que se describen a continuación.

El material de construcción incluye cuatro tipos principales de edificios, ordenados por orden decreciente de resistencia: hormigón armado, ladrillo y piedra, adobe y otros (madera, metal). También se consideró la presencia de estructura reforzada porque su presencia (hormigón armado o estructura con placa de refuerzo), proporciona una resistencia adicional al edificio (Xofi, 2021).

El número de pisos es un indicador de la profundidad de los cimientos, ya que cuanto mayor sea la altura de un edificio, más profundos y resistentes

serán los cimientos (Silva & Pereira, 2014). En este trabajo se consideran dos clases de número de plantas: 1 ó 2 y > 2 plantas.

La fecha de construcción del edificio indica indirectamente el estado de conservación y la calidad constructiva de los edificios según el periodo de construcción. Esta variable se dividió en cuatro clases, en orden descendente de calidad de construcción: (i) el periodo anterior a 1919 que incluye los edificios más antiguos e históricos, con muros de mampostería y estructura de madera en los pisos y el techo; (ii) el periodo entre 1919 y 1960, que incluye el periodo de las dos guerras mundiales marcado por la escasez de materias primas, como el acero; se caracteriza por la aparición de edificios de hasta 5 pisos con muros de mampostería y tablero de refuerzo; (iii) el período entre 1960 y 1990, caracterizado por el uso de mejores técnicas de construcción, incluido el uso de hormigón armado con muros de mampostería; y (iv) el período posterior a 1990, cuando los edificios tienen una buena calidad de construcción con hormigón armado y deben cumplir con los códigos de construcción antisísmica (Malheiros et al. , 2018; Xofi, 2021).

En la base de datos BGE también se utilizó información sobre las variables relacionadas con la necesidad de reparación en la estructura y el revestimiento de los edificios de viviendas, que se dividen en las siguientes clases, en orden creciente de vulnerabilidad: (i) no necesita reparaciones; (ii) necesita reparaciones pequeñas; (iii) necesita reparaciones medianas; (iv) necesita reparaciones grandes; y (v) necesita reparaciones muy grandes.

El material de construcción y la estructura reforzada tienen la mayor importancia en la definición de la resistencia del edificio, lo que justifica que juntos tengan el mayor peso (0,5) en la definición de la vulnerabilidad física del edificio. Se atribuyeron pesos similares en trabajos anteriores (Silva & Pereira, 2014; Pereira et al., 2020).

El número de plantas está directamente relacionado con los materiales de construcción y la existencia de una estructura de refuerzo, lo que justifica su ponderación de 0,2 en la evaluación de la vulnerabilidad física de los edificios. El estado de conservación se infiere indirectamente de la fecha de construcción del edificio, y se le atribuyó una ponderación menor (0,1), debido a la posibilidad de sesgos en esta variable. En algunos casos puntuales, algunos edificios patrimoniales pueden presentar un muy buen

estado de conservación, así como puede ocurrir lo contrario en edificios más recientes que pueden presentar un mal estado de conservación.

Tabla 3 – Características del edificio y pesos de vulnerabilidad física respectivos para un escenario de 1 m de profundidad de la superficie de falla y un escenario de 0,5 m de altura de material acumulado

Variavel	Clases	Vulnerabilidade física	
		1m de profundidad de la superficie de rotura	0,5 m de altura de material acumulado
Material de construcción (MC)	Hormigón armado	0,3	0,2
	Ladrillo y piedra	0,43	0,24
	Adobe	0,59	0,29
	Otros (madera, metal)	0,64	0,39
Estructura reforzada (ER)	Hormigón armado	0,3	0,2
	Muros de mampostería, con tablero	0,3	0,2
	Muros de mampostería, sin tablero	0,43	0,24
	Muros de abobe o mampostería de piedra suelta	0,59	0,29
	Otros (madera, metal)	0,64	0,39
Número de pisos (NP)	>2	0,3	0,1
	1 o 2	0,5	0,3
Estado de conservación (EC)	>1991	0,3	0,1
	1961<1991	0,5	0,3
	1919<1961	0,7	0,5
	<1919	0,9	0,7
Necesidad de reparar la estructura (NRE)	No se requiere ninguna reparación	0,2	0,1
	Necesita pequeñas reparaciones	0,4	0,3
	Necesita reparaciones medianas	0,6	0,5
	Necesita reparaciones importantes	0,8	0,8
	Necesita reparaciones muy importantes	1	1
Necesidad de reparar el revestimiento (NRR)	No se requiere ninguna reparación	0,2	0,1
	Necesita pequeñas reparaciones	0,4	0,3
	Necesita reparaciones medianas	0,6	0,5
	Necesita reparaciones importantes	0,8	0,8
	Necesita reparaciones muy importantes	1	1

La vulnerabilidad física de cada edificio residencial expuesto al peligro de inestabilidad de la ladera en el municipio de Setúbal se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{fe} = (MC \times 0,3) + (ER \times 0,2) + (NP \times 0,2) + (EC \times 0,1) + (NRE \times 0,1) + (NRR \times 0,1) \quad (4)$$

2.4 Evaluación de la vulnerabilidad física de las carreteras del municipio de Arruda dos Vinhos

En este trabajo se asume que la evaluación de la vulnerabilidad física de las carreteras está directamente relacionada con la vulnerabilidad estructural, considerando, para ello, los mismos supuestos aplicados para la evaluación de la vulnerabilidad física de los edificios, referidos en el apartado anterior (Alexander, 2004; Ciurean et al., 2013; Uzielli et al., 2014; Oliveira et al., 2016):

- (i) el nivel de los daños depende de la tipología y de la magnitud del movimiento del talud;
- (ii) el nivel de daño estructural o no estructural depende en gran medida de la resistencia del elemento afectado;
- (iii) la posición del elemento afectado dentro de la masa de deslizamiento condiciona el potencial de vulnerabilidad;
- (iv) el nivel de daño puede referenciarse cualitativa o cuantitativamente para la determinación de los patrones de deformación.

2.4.1 Datos de entrada para evaluar la vulnerabilidad física de las carreteras

2.4.1.1 Inventario de los movimientos de ladera e inventario de los daños causados por los movimientos de ladera en las carreteras

Para este trabajo, y con el fin de dotar de mayor robustez a la metodología de evaluación de la vulnerabilidad física de las carreteras, se utilizó el inventario histórico de movimientos de ladera para toda la cuenca del río Grande da Pipa, obtenido por Oliveira (2012) (Figura 3), con 1434 movimientos de ladera inventariados.

El inventario multitemporal de los movimientos de ladera se basó en un estudio de campo de las manifestaciones de inestabilidad entre 2006 y 2010, apoyado en cartografía sobre ortofotomapas, a escala 1:10 000, con celda de 0,5 m, reproducida a escala 1:2 000 (Oliveira, 2012). El inventario se complementó con la fotointerpretación de fotografías aéreas verticales (1983, 1989), a escala 1:15 000, y ortofotomapas (de 2004 a 2007), y con la

interpretación de modelos de relieve sombreado, derivados del modelo numérico de elevación, obtenido a partir del modelo topográfico, a escala 1:10 000 (Oliveira et al., 2015).

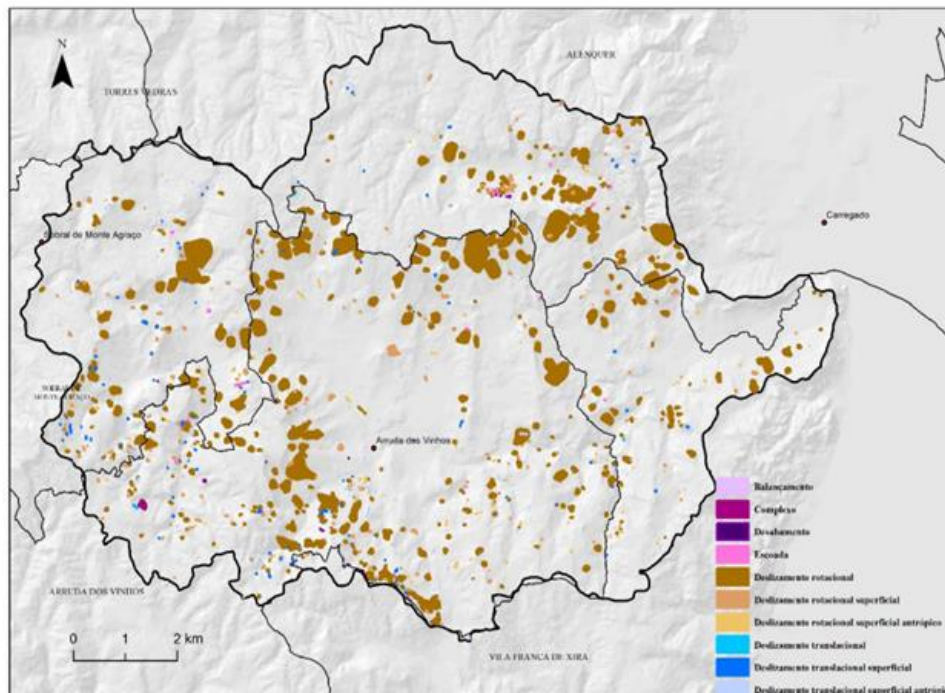


Figura 3 – Inventario de movimientos de ladera en la cuenca del río Grande da Pipa. Fuente: Oliveira (2012).

La distribución de los movimientos de ladera, por tipo y área inestable respectiva, se muestra en la Tabla 4. La tipología sigue la clasificación propuesta por Cruden y Varnes (1996) y la distinción entre deslizamientos superficiales y profundos se realiza a través de la posición de la superficie de ruptura, con el límite situado a 1,5 m de profundidad (Záruba y Mencl, 1982). Se observa el predominio de los movimientos de ladera de tipo rotacional (69%), representando los deslizamientos rotacionales profundos el 93,1% de la superficie total inestabilizada.

Una parte importante de los movimientos de ladera incluidos en el inventario histórico causaron daños (en carreteras o edificios) en la cuenca del río Grande da Pipa (Tabla 5). La mayor parte de los daños está asociada a la ocurrencia de deslizamientos superficiales traslacionales (41,5%), que se producen principalmente en los taludes de las carreteras, seguidos de los

deslizamientos rotacionales, tanto profundos como superficiales (28,4% cada uno) (Tabla 5).

Tabla 4 – Tipología y frecuencia de los movimientos de ladera, en la cuenca del río Grande da Pipa. Adaptado de Oliveira (2012)

Tipo de movimiento de vertente	Movimientos de vertente		Área instabilizada		Área de estudio (%)
	(#)	(%)	(m ²)	(%)	
Deslizamiento rotacional profundo	572	39,9	6034204	93,1	5,46
Deslizamiento rotacional superficial	417	29,1	319018	4,9	0,29
Deslizamiento translacional profundo	5	0,3	9344	0,1	0,008
Deslizamiento translacional superficial	382	26,6	78095	1,7	0,07
Complejo	2	0,1	17119	0,3	0,015
Escoada	33	2,3	19033	0,3	0,017
Desabamento	16	1,1	5814	0,1	0,005
Balançamento	7	0,5	1775	0,03	0,002
Total	1.434	100	6.484.402	100	5,9

Tabla 5 – Tipología y frecuencia de los movimientos de ladera que causaron daños en carreteras o edificios, en la cuenca del río Grande da Pipa. Adaptado de Oliveira (2012)

Tipo de movimiento de vertente	Movimientos de vertente que causaram danos	
	(#)	(%)
Deslizamiento rotacional profundo	114	28,4
Deslizamiento rotacional superficial	114	28,4
Deslizamiento translacional superficial	167	41,5
Escoada	4	1,0
Balançamento	3	0,7
Total	399	100

La evaluación del grado de pérdida en función de la magnitud/intensidad de los movimientos de la ladera se basó en el criterio de la profundidad de la superficie de rotura del desprendimiento. Esto fue inferido a partir de la relación entre el área y el volumen de 162 deslizamientos registrados en la cuenca del RGP (con registros morfométricos de campo), según las relaciones empíricas establecidas por Oliveira (2012), para la cuenca del río Grande da Pipa, e internacionalmente por Guzzetti et al. (2009).

Para ello, y para los deslizamientos traslacionales, la profundidad de la superficie de ruptura se calculó a partir de la ecuación descrita por Surdenau (1986 en Zêzere, 1997):

$$h = 0,785 / a/b/Vmv \quad (5)$$

donde: h - altura de la cicatriz; a - mitad de la anchura máxima de la zona afectada; b - longitud del plano de ruptura; y Vmv - volumen (m^3).

En el caso de los deslizamientos rotacionales, se utilizó la siguiente ecuación (*Commision on Landslides* de la IAEG,1990; y Zêzere, 1997):

$$Dd = 6 / Vmv * \pi / L / W \quad (6)$$

donde: Dd - espesor máximo de la masa deslizante, a veces sustituido por la profundidad máxima del plano de ruptura; Vmv - volumen (m^3); L - longitud total de la zona afectada; y W - anchura máxima de la zona afectada.

El valor final de la profundidad de la superficie de ruptura fue determinado por el promedio de los valores de la profundidad de la superficie de ruptura, estimados en base a los dos volúmenes calculados a partir de las relaciones empíricas área-volumen establecidas por Oliveira (2012) y Guzzetti et al. (2009).

Para la transformación a otros indicadores de intensidad/magnitud, como por ejemplo, la profundidad de la superficie de ruptura, recurrimos a la relación profundidad/volumen de la superficie de ruptura estimada para los 162 deslizamientos (Figura 4).

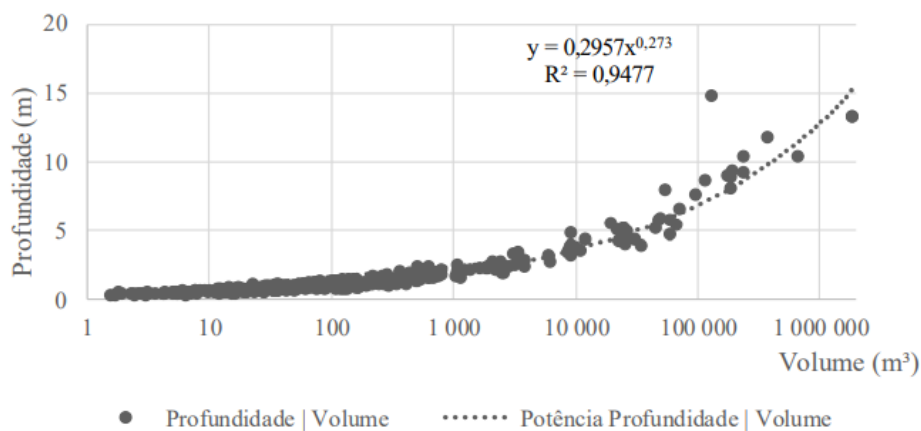


Figura 4 – Relación profundidad de la superficie de ruptura (m) / volumen (m^3) para los desprendimientos en la cuenca del RGP.

Otro factor que puede condicionar el grado de pérdida es la posición del elemento expuesto en relación con los diferentes sectores de movimiento de la ladera (Glade et al., 2005; van Westen et al., 2006; Léone, 2007). En el caso de la cuenca del río Grande da Pipa, los deslizamientos aparecen como el tipo de movimiento de ladera predominante, y los siguientes contextos de inestabilidad expresan cómo pueden afectar a las carreteras (Figura 5).

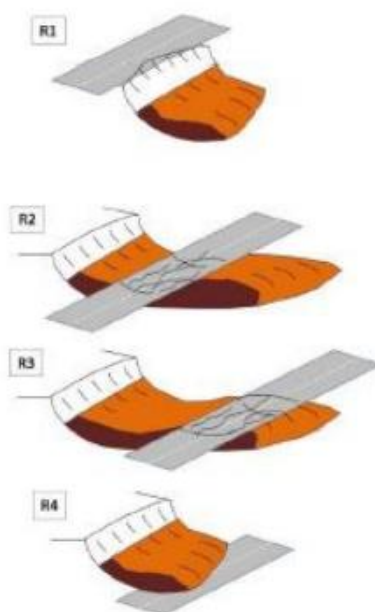


Figura 5 – Tipología de las relaciones entre los diferentes sectores de movimiento de la pendiente (pie, cicatriz, cuerpo) y la posición de los caminos.

2.4.1.2 Carreteras expuestas a la inestabilidad de los taludes

En cuanto a la resistencia del elemento afectado (carreteras) se sabe que está relacionada con la tipología constructiva, habiéndose podido individualizar cuatro categorías y una subcategoría de tipo de carretera rural (García, 2012; Oliveira, 2012):

V1 - camino rural de tierra o con base o capa de regularización de otros materiales menos resistentes (por ejemplo, macadán, tout-venant);

V1a - caminos rurales (camino rural no pavimentado, sin base o capa de base, y con imposibilidad de paso (anchura) de un vehículo de motor);

V2 - carretera municipal o similar, siempre que estén asfaltadas;

V3 - carretera nacional;

V4 - autopista.

En general, se considera que la resistencia estructural de las carreteras aumenta progresivamente de V1 a V4.

La vulnerabilidad de las carreteras a los movimientos de ladera se ilustra sólo para un área de muestra en la cuenca del río Grande da Pipa, correspondiente al municipio de Arruda dos Vinhos. Esta limitación espacial se basó en la disponibilidad, hasta la fecha, de datos relativos a la red de carreteras. La distribución de las carreteras por tipo, en el municipio de Arruda dos Vinhos, puede verse en la Figura 6.

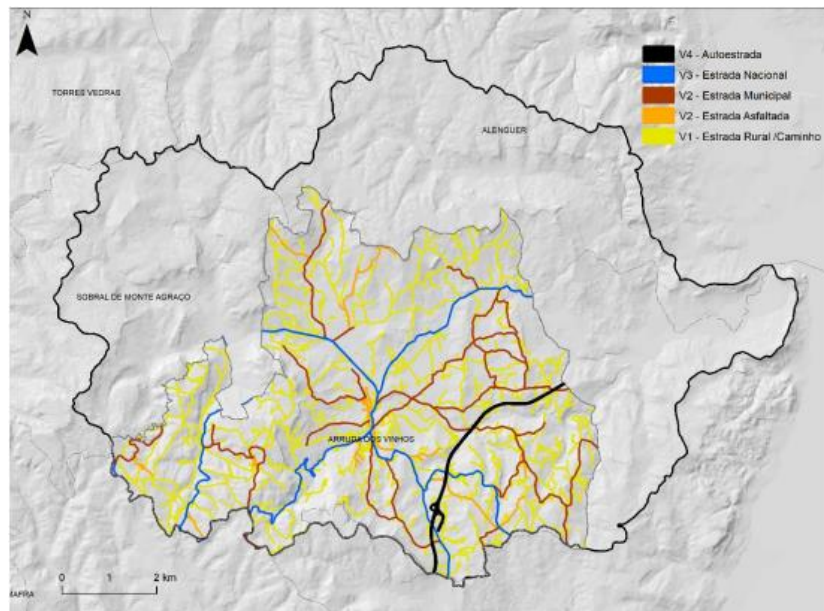


Figura 6 – Red de carreteras por tipo de carretera en la zona del municipio de Arruda dos Vinhos dentro de la cuenca del RGP.

Para la evaluación de la vulnerabilidad física de las carreteras, se seleccionaron 352 ocurrencias de movimientos de ladera de tipo deslizamiento que afectaron a estas estructuras del conjunto de 402 ocurrencias de movimientos de ladera que causaron daños a elementos expuestos en la cuenca del río Grande da Pipa. La mayoría de los daños se produjeron en carreteras municipales (156 casos) y nacionales (68 casos). En las carreteras y caminos rurales se registraron 56 y 54 incidencias, respectivamente, y sólo 18 afectaron a tramos de carretera. Otros tipos de

movimiento, como la escorrentía o el vuelco, se excluyeron de este estudio porque tienen una baja expresión en la zona de estudio.

2.4.1.3 Vulnerabilidad física de las carreteras

La metodología utilizada para evaluar la vulnerabilidad física de las carreteras se basa en un conjunto de criterios y marcadores de deformación que permiten evaluar el grado de pérdida cuando las carreteras se ven afectadas por movimientos de ladera de cierta magnitud.

Este enfoque, propuesto por Alves (2018), adaptado de Alexander (1989); García (2012); Oliveira et al. (2016), contempla una diferenciación en diez clases de grado de pérdida/nivel de daño ajustado a un intervalo de clase de 0,1, con el fin de mejorar la precisión de la evaluación de la vulnerabilidad.

Los elementos que vinieron a corresponder a marcadores únicos de deformación/pérdida de funcionalidad para la determinación del grado de pérdida de la carretera según la tipología de los daños sufridos son:

- (a) la apertura de fisuras o grietas de tensión en el pavimento de la carretera;
- b) el desnivel de las fracturas en el pavimento de la vía
- c) la amplitud de ondulación del pavimento de la vía
- d) el tiempo de interrupción/acondicionamiento del tráfico;
- e) Pérdida de resistencia del soporte lateral de la carretera en el terraplén;
- f) acumulación de material.

Los criterios de deformación vertical y horizontal se ajustaron a lo que se supone que es la capacidad de un coche de pasajeros para superar un obstáculo, sin embargo, sin considerar su velocidad de movimiento.

A continuación, se describen algunos aspectos relativos a los criterios adoptados en este enfoque para la evaluación del grado de pérdida.

a) Apertura de fisuras o grietas de tracción en el pavimento de la vía

En el caso de las fracturas en el pavimento de la vía con aberturas de hasta 10 cm (figuras 7A y 7B) se suponen daños leves y no se espera la

interrupción de la circulación de vehículos. Si la abertura de la fractura es de entre 10 y 30 cm (Figura 7C superior), se puede restringir o incluso impedir el tráfico de vehículos. En los casos en los que las fracturas en el pavimento de la carretera superan los 30 cm (Figura 7C base), se interrumpió la circulación de vehículos, lo que atestigua la existencia de graves problemas estructurales que comprometen la funcionalidad de la carretera.



Figura 7 – Apertura de grietas/fracturas que afectan al pavimento y a la estructura de la carretera. A) grietas que se abren hasta 5 cm; B) grietas que se abren entre 5 y 10 cm; C) grietas que se abren hasta 30 cm (parte superior de la foto) y mayores de 30 cm (parte inferior de la foto)

b) Desnivel vertical de las fracturas y amplitud de la ondulación del pavimento de la vía

En el caso de la pendiente vertical registrada en las fracturas a lo largo de la carretera y la ondulación del firme, se adoptaron los mismos valores de referencia asociados al mismo grado de pérdida utilizado en el punto a).

Estos valores se ajustan a los valores de pendiente vertical definidos en la normativa de edificación para la altura estándar de los bordillos situados en los márgenes de las carreteras (por ejemplo, Regulamento da Urbanização e Edificação do Município de Cascais n.º 78-2013, artículo 41.º 1 a) y para la altura de los separadores centrales de las carreteras. El límite de deformación vertical de 10 cm se utiliza como referencia para un obstáculo vertical que puede ser superado por un vehículo en circulación (vehículo ligero de pasajeros), pero que implica una disminución sustancial de la velocidad de circulación; el valor de 30 cm se adoptó para fijar la caída vertical máxima, a partir de la cual un vehículo ligero de pasajeros no puede superar el obstáculo, independientemente del tipo de firme.

En los casos en los que, mediante el trabajo de campo, se comprobó que las marcas de deformación vertical ya no eran visibles, debido a las obras de restauración, se utilizaron registros indirectos para inferir el valor de la deformación vertical anterior. Para ello, se tuvo en cuenta: (1) el tipo de capa de carretera restaurada, (2) el número de capas de carretera restauradas y (3) el espesor de cada capa de carretera en función del tipo de carretera.

En el caso de la ondulación del pavimento, se asume el criterio de la altura de la deformación curvilínea/ondulatoria en la superficie de la carretera. Hasta 10 cm de ondulación, se supone que sólo hay una ligera obstrucción del tráfico; si la altura de la deformación está entre 10 y 30 cm, se supone que es suficiente para restringir de forma moderada a severa la velocidad del tráfico; para la ondulación de la superficie de la carretera con una altura superior a 30 cm, se supone que el tráfico se interrumpe.

c) Tiempo de interrupción/acondicionamiento del tráfico

En este parámetro se ha asumido que el grado de pérdida aumenta cuanto más tiempo dura la interrupción/acondicionamiento de la circulación de los vehículos a motor, principalmente como consecuencia de la mayor complejidad en la recuperación del elemento afectado. Se consideraron los siguientes plazos relacionados con la interrupción/acondicionamiento de la circulación y el respectivo grado de pérdida: (i) menos de un día (grado de pérdida 0,1); (ii) menos de 3 días (grado de pérdida 0,2); (iii) menos de 5 días (grado de pérdida 0,3); (iv) menos de 10 días (grado de pérdida 0,4); (v) menos de 15 días (grado de pérdida 0,5); (vi) menos o igual a 30 días (1 mes laborable) (grado de pérdida 0,6); (vii) de 1 mes a 3 meses (grado de pérdida 0,7); (viii) 6 meses y 1 año (grado de pérdida - 0,8 y 0,9, respectivamente); y (ix) más de 1 año (grado de pérdida total - 1).

d) Pérdida de resistencia del soporte lateral de la carretera e el terraplén

Para los movimientos de talud que se producen sólo en el talud inferior, que constituye el apoyo lateral a los lados de las carreteras construidas parcial o totalmente en terraplén, se decidió ajustar el valor del grado de pérdida en función de la altura del talud inferior de la carretera en terraplén y de la posición que ocupa la cicatriz principal del movimiento de talud en el mismo (25%, 50% o >50% de la altura del talud contada desde la vía). El

grado de pérdida asociado al talud inferior de la carretera, que actúa como muro de contención lateral de protección, se definió según los siguientes criterios:

(i) grado de pérdida = 0,2 - la ruptura originada por el movimiento del talud se localiza en la zona definida por el 25% de la altura del talud contada desde la vía (1/4 superior del talud);

(ii) grado de pérdida = 0,3 - el movimiento del talud afecta hasta el 50% de la altura del talud contada desde la vía (1/2 superior del talud);

(iii) grado de pérdida = 0,4 - el movimiento del talud afecta a más del 50% de la altura del talud contado desde la vía.

En las situaciones en las que el movimiento de la pendiente en el talud de la carretera provoca algún tipo de deformación en la superficie de la misma -sedimentación de la superficie de la carretera o grietas de tracción por falta de apoyo lateral- se añadió un 0,1 grado de pérdida a los valores de referencia definidos anteriormente. Por ejemplo: un desprendimiento que se produjera en la mitad superior del talud, que afectara hasta el 50% de su altura, y que provocara simultáneamente el hundimiento de la superficie de la calzada, se clasificó con un grado de pérdida final de 0,4 (0,3 + 0,1). En los casos de movimientos de ladera que sólo afectan a la cuarta parte inferior del talud se ha considerado que el grado de pérdida no supera el 0,1.

e) Acumulación de material

En cuanto a la acumulación de material en una situación de enterramiento, se asumió que cuanto mayor fuera la altura del depósito de desprendimiento, mayor sería el grado de pérdida. Los criterios asociados a cada uno de los marcadores mencionados, para la evaluación del grado de pérdida, se sintetizan en la Tabla 6.

Tabla 6 – Criterios adoptados: nivel de daños, grado de pérdida y tipología de daños en las carreteras (adaptado de Alexander, 1989; García, 2012; Oliveira et al., 2016)

Carreteras			
Nivel de daños	Grado de pérdida	Situación de rotura o deformación	Situación de soterramiento
D0	0	No se observan daños.	No aplicable.
D1 Insignificante (daños estéticos)]0,1; 0,2]	0,1	ligera deformación del pavimento (ondulación <5 cm). Ausencia de grietas en el pavimento.	Acumulación de material de hasta 0,5 m de altura que cubre hasta el límite de 1 carril o la mitad de la vía. Interrupción/acondicionamiento del tráfico <1 día. No hay daños visibles.
	0,2	Pequeña deformación del pavimento (ondulación <5 cm). Fracturas con desniveles/aberturas <1 cm.	Acumulación de material de hasta 0,5 m de altura que cubre más de un carril o más de la mitad de la vía. Interrupción/acondicionamiento del tráfico <3 días. Daños en la superficie del pavimento: destrucción vertical <1cm.
D2 Ligeramente (daños menores)]0,3; 0,4]	0,3	Fracturas con desniveles/aberturas entre 1 y 5 cm. Deformación del suelo (ondulación/ pandoe <5 cm).	Acumulación de material entre 0,5 m y 2 m de altura que cubre hasta el límite de 1 carril o la mitad de la vía. Interrupción del tráfico/acondicionamiento <5 días. Daños leves en el pavimento: destrucción vertical <5cm.
	0,4	Fracturas con desniveles/aberturas entre 5-10 cm en la vía. Deformación del pavimento (ondulación/ pandoe 5-10 cm).	Acumulación de material de entre 0,5 m y 2 m de altura que cubre más de un carril o más de la mitad de la vía. Interrupción del tráfico/acondicionamiento <10 días. Daños moderados en el pavimento: destrucción vertical <10cm.
D3 Importante (daños importantes/es estructurales) Reparación compleja.]0,5; 0,6]	0,5	Fracturas con desniveles/aberturas entre 10 y 30 cm. Deformación del pavimento (ondulación/ pandoe <30 cm). Las fracturas o deformaciones dañan 1 carril o la mitad de la vía.	Acumulación de material superior a 2 m de altura que cubre hasta el límite de 1 carril o la mitad de la carretera. Interrupción/acondicionamiento del tráfico <15 días. Daños importantes en el pavimento (destrucción vertical <30cm).
	0,6	Fracturas con desniveles/aberturas entre 10 y 30 cm. Deformación del pavimento (ondulación/ pandoe <30 cm). Fracturas o deformaciones que dañan más de un carril o más de la mitad de la vía.	Acumulación de material de más de 2 m de altura que cubra más de un carril o más de la mitad de la vía. Interrupción/acondicionamiento del tráfico <30 días. Daños importantes en el pavimento: destrucción vertical <30cm.
D4 Severo Danos estructurales]0,7; 0,8]	0,7	Fracturas con desniveles/aberturas superiores a 30 cm pero inferiores a la mitad de la altura de la estructura de la carretera. Las fracturas o deformaciones dañan hasta el límite de 1 carril o la mitad de la carretera.	Acumulación de material de más de 2 m de altura que cubra más de un carril o más de la mitad de la vía. Interrupción/acondicionamiento del tráfico <90 días. Daños graves que afectan a la estructura de la carretera: destrucción vertical >30cm y menos de la mitad de la altura de la estructura de la carretera.
	0,8	Fracturas con desniveles/aberturas superiores a 30 cm pero inferiores a la mitad de la altura de la estructura de la carretera. Fracturas o deformaciones que dañan más de un carril o más de la mitad de la carretera.	Acumulación de material de más de 2 m de altura que cubra más de un carril o más de la mitad de la vía. Interrupción del tráfico/acondicionamiento <6 meses. Daños graves que afectan a la estructura de la carretera: destrucción vertical >30cm y menos de la mitad de la altura de la estructura de la carretera

D5 -]0,9; 1] Muy grave Daños estructurales que comprometen seriamente la integridad estructural	0,9	<p>Fracturas con desniveles/aberturas superiores a 30 cm que dañen más de 1 carril o más de la mitad de la carretera.</p> <p>Deformación vertical superior a la mitad de la altura de la estructura de la carretera.</p> <p>Puede llevar al abandono de la carretera..</p>	<p>Acumulación de material de más de 2 m de altura que cubra más de un carril o más de la mitad de la vía.</p> <p>Interrupción/acondicionamiento del tráfico <12 meses. Daños muy graves que afectan a la estructura de la carretera: destrucción vertical >30cm y más de la mitad de la altura de la estructura de la carretera.</p>
	1	<p>Destruye completamente toda la estructura de la carretera: capa de rodadura, granular y capas de cimentación/terreno.</p>	<p>Acumulación de material de más de 2 m de altura que cubra más de un carril o más de la mitad de la vía.</p> <p>Interrupción/acondicionamiento del tráfico >12 meses. Destruye completamente toda la estructura de la carretera: capa de rodadura; granular; cimientos/terreno; y estructuras de drenaje de aguas pluviales.</p>

3 RESULTADOS

3.1 Vulnerabilidad social en el municipio de Setúbal

3.1.1 Criticidad

La aplicación de los procedimientos descritos en el apartado 2.1 condujo a la selección de 27 variables para la ejecución inicial del ACP de evaluación de la criticidad (Tabla 7). Tras la eliminación iterativa de las redundancias entre las variables y la interpretación de los componentes principales y las respectivas variables explicativas, se conservaron un total de 12 variables (Tabla 7).

Tabla 7 – Lista de variables utilizadas inicial e iterativamente en el ACP e indicación de las variables retenidas en el modelo de criticidad final, en el Área Metropolitana de Lisboa, a la que pertenece el municipio de Setúbal

Código	Denominación de la variable	Mantenida en el modelo final
Alo_fa_vag	Proporción de viviendas vacantes (%)	No
AlojArrend	Proporción de viviendas de residencia habitual alquiladas (%)	Si
Al_5maisDi	Proporción de viviendas con 5 o más habitaciones (%)	No
Al_ate50m2	Proporción de viviendas de residencia habitual de hasta 50 m ² (%)	Si
Almais200m	Proporción de viviendas de residencia habitual con una superficie superior a 200 m ² (%)	No
Al_c_banho	Proporción de viviendas de residencia habitual con baño (%)	Si
Ed_ate1970	Proporción de edificios construidos antes de 1970 (%)	Si
Ed_12pisos	Proporción de edificios de 1 o 2 plantas (%)	No
Ed_5mai_pi	Proporción de edificios con 5 o más plantas (%)	No
Ed_betao	Proporción de edificios con estructura de hormigón armado (%)	Si
Ed_pedra	Proporción de edificios con estructura de adobe o piedra suelta (%)	No
In_freq_bas	Proporção de indivíduos que frequentam o ensino básico (%)	No
In_1bas_co	Proporção de indivíduos residentes com o 1º ciclo do ensino básico concluído (%)	Si
In_sup_co	Proporción de individuos residentes con educación terciaria completa (%)	Si
In_ nao_ler	Proporción de personas residentes que no saben leer ni escribir (%)	No
In_emp_1ar	Proporción de la población empleada en el sector primario (%)	No
In_emp_2ar	Proporción de la población empleada en el sector secundario (%)	Si
In_desemp	Proporción de la población de 25 a 64 años desempleada que busca un nuevo empleo o busca su primer empleo (%)	No
In_emprega	Proporción de la población de 25 a 64 años empleada (%)	Si
In_et_mun	Proporción de personas residentes que estudian y trabajan en su municipio de residencia (%)	No

Código	Denominación de la variable	Mantenido en el modelo final
In_et_outro	Proporción de la población residente que trabaja o estudia que lo hace en otro municipio (%)	No
Fa_c_5mais	Proporción de hogares privados con 5 o más personas (%)	Si
Pop_0_4	Población residente menor de 5 años (%)	No
Pop_65mais	Población residente de 65 años o más (%)	Si
Ind_p_aloj	Número medio de personas por vivienda convencional (n°)	No
Rel_Mascul	Relación de la masculinidad	No
Pop_femi	Proporción de población femenina en la población total residente (%)	Si

Para el conjunto de 12 variables retenidas, se registró un valor Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de 0,722 y un porcentaje de la varianza total, explicada por los 4 componentes principales (FAC), del 73,7%.

La matriz de componentes (Tabla 8) permite interpretar la dimensión de criticidad que se representa en cada FAC.

Tabla 8 – Matriz de componentes realizada para la criticidad, identificando los principales componentes, su cardinalidad y % de varianza explicada, y las respectivas variables explicativas.

	Componente Principal (FAC)			
	1	2	3	4
Zscore (In_sup_co)	-0,889	0,119	-0,09	-0,111
Zscore (In_1bas_co)	0,860	0,289	0,246	0,031
Zscore (In_emp_2ar)	0,717	-0,472	0,023	-0,117
Zscore (In_emprega)	-0,703	-0,245	-0,096	-0,357
Zscore (Pop_65mais)	0,233	0,822	0,188	-0,220
Zscore (Pop_femi)	-0,145	0,777	-0,122	-0,065
Zscore (Ed_ate1970)	0,014	0,643	0,537	-0,152
Zscore (AlojArrend)	0,154	0,549	0,511	0,464
Zscore (Ed_betao)	0,042	-0,091	-0,767	0,135
Zscore (Al_c_banho)	-0,231	0,175	-0,708	-0,069
Zscore (Al_ate50m2)	0,290	0,342	0,663	0,220
Zscore (Fa_c_5mais)	0,143	-0,311	-0,046	0,832
Cardinalidad	+	+	+	+
Varianza explicada total (%)	32,5	22,5	10,3	8,4

A partir de estas estadísticas, se considera que las siguientes dimensiones están representadas en el modelo final de criticidad: empleo y cualificación (ACF1), que explica el 32,5% de la varianza total; edad, género y contexto urbano envejecido (ACF2), que explica el 22,5% de la varianza total; condiciones de vivienda (ACF3), que explica el 10,3% de la varianza total; y estructura familiar (ACF4), que explica el 8,4% de la varianza total.

Los valores de criticidad del municipio de Setúbal están dentro del universo de valores calculados para el AML, es decir, en las 192 secciones del municipio los valores se contextualizan en la totalidad de las 4521 secciones estadísticas del AML. Considerando el rango de valores normalizados entre 0 y 1, la criticidad media en el municipio de Setúbal es de 0,53, valor ligeramente superior a la media de AML (0,49).

La expresión cartográfica identifica como secciones estadísticas más críticas las situadas en el centro urbano de Setúbal, pertenecientes a la parroquia de S. Julião, N. S. da Anunciação y S. Maria da Graça y la parroquia de Setúbal (São Sebastião) (Figura 8). Se identifican algunos tramos estadísticos más alejados del centro, con una criticidad muy alta, en las zonas de Viso, Troino, Rua Senhor Jesus dos Aflitos y Casal das Figueiras, al este, y Camarinha y Bairro da Boavista, al oeste.

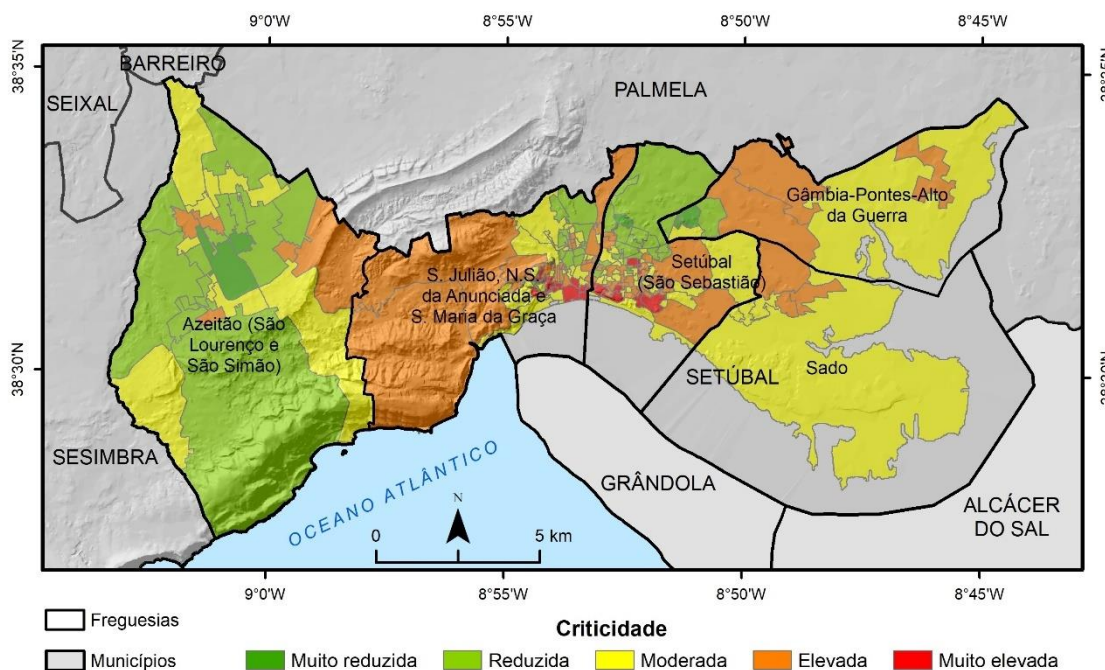


Figura 8 – Criticidad en el municipio de Setúbal, a nivel de la sección estadística

En la contextualización con la AML, el 43,3% de las secciones estadísticas del municipio de Setúbal se encuentran en las clases alta y muy alta y el 24% en las clases baja y muy baja (Tabla 9). La información de este cuadro sobre el número de habitantes es el resultado de un ejercicio estadístico que cuantifica la población residente según la clase de criticidad asignada a cada sección estadística. El objetivo de este ejercicio es obtener una imagen aproximada del contexto de criticidad en Setúbal con respecto al ALD. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el hecho de que una determinada sección esté clasificada con una determinada clase de criticidad no significa que todos los habitantes entren en esa clase de criticidad, es decir, naturalmente habrá residentes en esa unidad territorial con otros niveles de criticidad.

Tabla 9 – Distribución de las secciones estadísticas y de la respectiva población residente por clase de criticidad en el municipio de Setúbal y su entorno en el AML

Clase de Criticidad		AML		Setúbal	
		N.º	%	N.º	%
Muy reducida	Secciones	324	7,2	5	2,6
	Hab.	217214	7,7	4528	3,7
Reducida	Secciones	1053	23,3	41	21,4
	Hab.	710538	25,2	29303	24,2
Moderada	Secciones	1706	37,7	63	32,8
	Hab.	1067905	37,8	40923	33,8
Elevada	Secciones	1165	25,8	63	32,8
	Hab.	675570	24	37264	30,8
Muy elevada	Secciones	273	6,0	20	10,4
	Hab.	150649	5,3	9167	7,6
Total	Secciones	4521	100	192	100
	Hab.	2821876	100	121185	100

Al observar el mapeo de las puntuaciones de cada componente principal (Figura 9), se destacan del análisis secciones estadísticas que - a pesar de presentar una criticidad moderada o alta - presentan, sin embargo, en algunos de los componentes principales de criticidad, valores que merecen ser referenciados, debido a la identificación de dimensiones de vulnerabilidad que requieren respuestas locales y específicas.

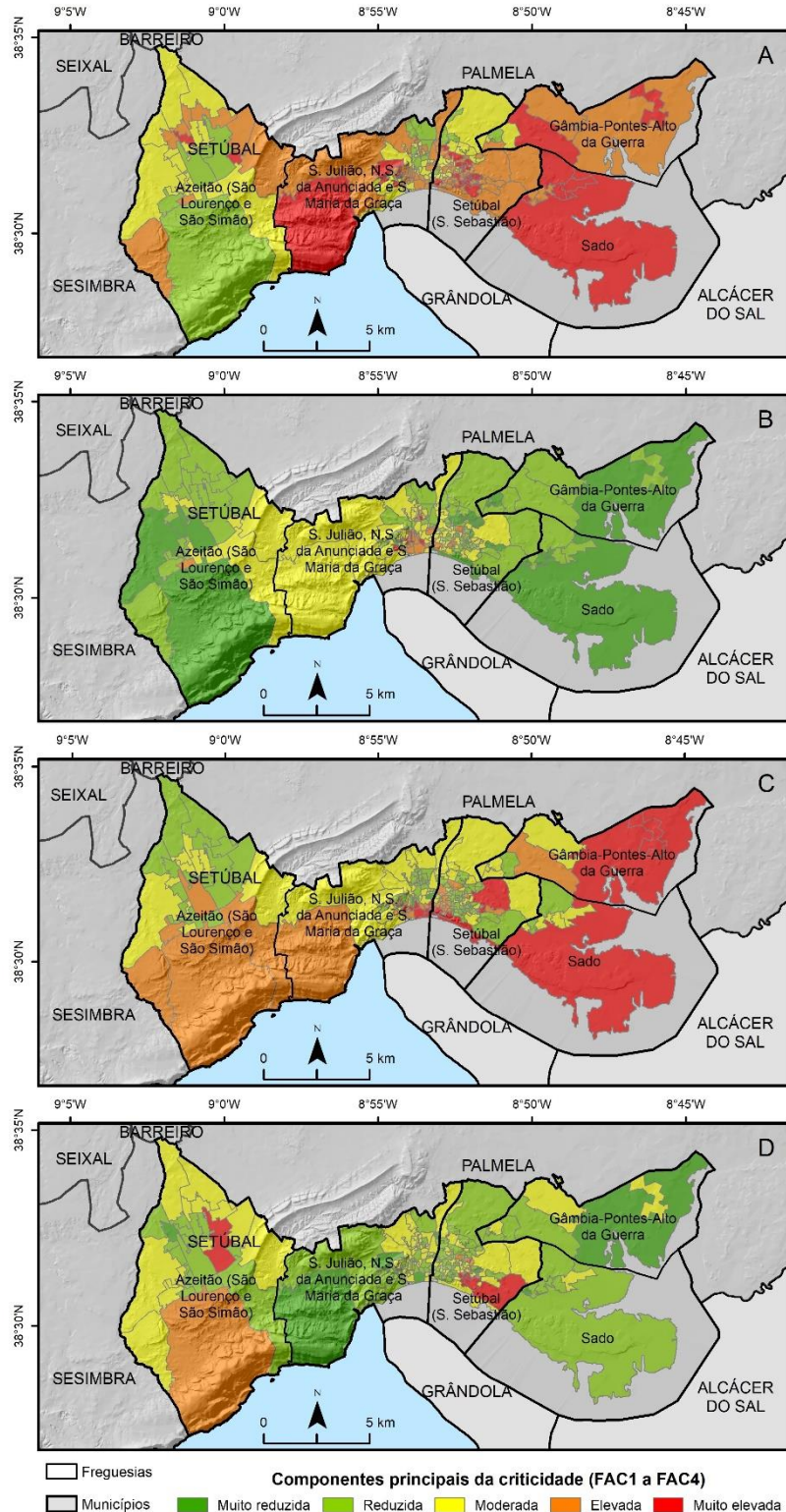


Figura 9 – Puntuaciones de los principales componentes de criticidad en el municipio de Setúbal, a nivel de sección estadística: empleo y cualificación - FAC1 (A), edad, género y envejecimiento del contexto urbano - FAC2 (B), condiciones de vivienda - FAC3 (C), y estructura familiar - FAC4 (D). Clasificación según la desviación estándar.

En cuanto al componente principal que representa el empleo y las cualificaciones (FAC1, Figura 9-A), que explica el 32,5% de la varianza total, las puntuaciones más altas se localizan en: a) dos secciones estadísticas de las freguesias de Azeitão (São Lourenço y São Simão); b) algunas secciones estadísticas de la periferia de la ciudad de Setúbal pero pertenecientes a las dos freguesias que la componen; c) dos secciones estadísticas de la freguesia de Gambia-Pontes-Alto da Guerra; y d) casi todas las secciones estadísticas de la freguesia de Sado.

En cuanto al FAC2, que representa las dimensiones de edad, género y contexto urbano envejecido (Figura 9-B), destacan una sección en el barrio del Liceo y otras en los ya mencionados barrios del Viso y Troino, todos ellos situados en las parroquias de S. Julião, N. S. da Anunciação y S. Maria da Graça. La dimensión de criticidad referida a las condiciones de la vivienda (FAC3, Figura 9-C) presenta puntuaciones más preocupantes cerca de la zona ribereña, desde el centro de la ciudad hacia el oeste (parroquias de S. Julião, N. S. da Anunciação y S. Maria da Graça y Setúbal (São Sebastião)), y en los tramos estadísticos más al este en las parroquias de Gambia-Pontes-Alto da Guerra y Sado. Por último, el FAC4, que representa la estructura familiar (Figura 9-D) muestra puntuaciones más altas (no necesariamente de contextos de fragilidad socioeconómica) en Aldeia dos Pinheiros, parroquia de Azeitão (São Lourenço y São Simão); y en Bairro da Bela Vista y Cachofarra, parroquia de Setúbal (São Sebastião).

3.1.2 Capacidad de soporte

La aplicación de los procedimientos metodológicos descritos en el apartado anterior condujo a la selección de 9 variables para la ejecución inicial del ACP de la evaluación de la capacidad de soporte (Tabla 10). La matriz de correlación de Pearson no identifica pares de variables con alta redundancia: la mayor correlación observada (0,685) es entre la cobertura de los parques de bomberos y la cobertura de las comisarías PSP/GNR. Como no tienen las mismas funciones, se decidió mantener ambas. Por lo tanto, todas las variables se mantuvieron para la ejecución del modelo final de evaluación de la capacidad de soporte.

El conjunto de 9 variables retenidas obtuvo un valor Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de 0,912 (según Kaiser (1974) es una calificación "maravillosa") y

un porcentaje de la varianza total explicada por 2 componentes principales (FAC) del 65,9 %.

Tabla 10 – Lista de variables utilizadas inicial e iterativamente en el ACP e indicación de las variables retenidas en el modelo de criticidad final, en AML

Código	Denominación de la variable	Mantenida en el modelo final
N_unidAlo	Cobertura de los establecimientos hoteleros para el alojamiento temporario	Si
BOMBEInear	Cobertura de los parques de bomberos	Si
FARMACnear	Cobertura de las farmacias	Si
RV34_near	Cobertura de la red estructural de carreteras	Si
CSAUDEnear	Cobertura por los centros de salud	Si
HOSPnear	Cobertura por hospitales	Si
COMBUSTnear	Cobertura por gasolineras	Si
PSPGNRnear	Cobertura por comisarías de policía PSP/GNR	Si
BAclass2	Cobertura por los principales puntos de venta de alimentos	Si

El recorrido de la matriz de componentes (Tabla 11) permite interpretar la dimensión de la capacidad de soporte que se representa en cada componente principal (FAC).

Tabla 11 – Matriz de componentes rodada para la capacidad de soporte, identificando los principales componentes, su cardinalidad, el % de varianza explicada y las variables explicativas

	Componente Principal (FAC)	
	1	2
Zscore (FARMACnear)	0,861	0,124
Zscore (PSPGNRnear)	0,810	0,186
Zscore (COMBUSTnea)	0,793	0,024
Zscore (BOMBEInear)	0,769	0,203
Zscore (BAclass2)	0,762	0,053
Zscore (CSAUDEnear)	0,759	0,279
Zscore (RV34_near)	0,657	0,242
Zscore (HOSPnear)	0,565	0,518
Zscore (N_unidAlo)	-0,051	-0,950
Cardinalidad	-	-
Varianza total explicada (%)	54,7	11,1

La concentración de los equipamientos e infraestructuras de asistencia de emergencia, protección civil, sanidad y suministro de bienes de primera necesidad, en primer lugar en los centros municipales -y en segundo lugar en las juntas parroquiales y a lo largo de las principales vías de comunicación- hace que la mayoría de las variables, que no están fuertemente correlacionadas, se concentren en un único componente principal (FAC1) que representa la cobertura de las funciones y servicios vitales (54,7% de la varianza total). El segundo componente principal (FAC2) se basa principalmente en la variable que representa el potencial de alojamiento temporal, que sigue otra lógica territorial no totalmente coincidente con la macrocefalia de los principales centros urbanos, pero que explica una proporción mucho menor de la varianza (sólo el 11,1 %).

Al igual que en el caso de la criticidad, los valores de la capacidad de soporte del municipio de Setúbal se encuentran dentro del universo de valores calculados para el AML, es decir, los valores de las 192 secciones del municipio se contextualizan en la totalidad de las 4521 secciones estadísticas del AML. Considerando el rango de valores normalizados entre 0 y 1, la capacidad de soporte media en el municipio de Setúbal es de 0,898, valor ligeramente inferior a la media en AML (0,915). Sin embargo, y como se muestra en la cartografía de la capacidad de soporte del municipio de Setúbal (Figura 10), el rango de valores es significativo, con valores máximos superiores a 0,98 en el centro urbano de Setúbal (parroquias de S. Julião, N. S. da Anunciação y S. Maria da Graça y Setúbal (São Sebastião)). La capacidad de soporte disminuye hacia la periferia, siendo más reducida en las parroquias de Azeitão (São Lourenço y São Simão), Gambia-Pontes-Alto da Guerra y Sado, donde se observan valores inferiores a 0,50.

En la contextualización con la AML, el municipio de Setúbal presenta el 71,4% de las secciones estadísticas en las clases alta y muy alta, y sólo el 14,6% en las clases baja y muy baja (Tabla 12). La información de este cuadro sobre el número de habitantes es el resultado de un ejercicio estadístico que cuantifica la población residente según la clase de capacidad de soporte asignada a cada sección estadística. El objetivo es obtener una imagen aproximada del contexto de la capacidad de soporte en Setúbal en relación con el AML. En este punto, la advertencia relativa a la criticidad no se aplica aquí porque la capacidad de soporte abarca la totalidad de los habitantes de una sección estadística determinada. Así, más del 65% de los habitantes del municipio de Setúbal viven en zonas con capacidad de soporte

alta o muy alta. Naturalmente, la macrocefalia a la que nos referimos anteriormente también se observa aquí, ya que las secciones estadísticas más numerosas y más pobladas se encuentran cerca de los centros urbanos.

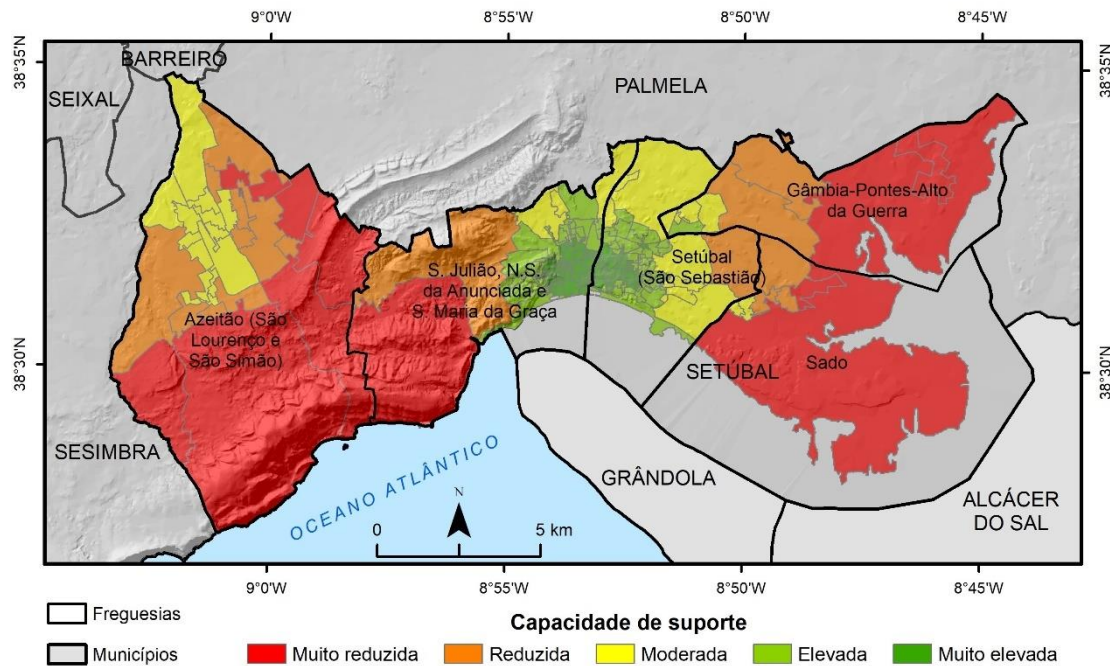


Figura 10 – Capacidade de suporte en el municipio de Setúbal, a nivel de la sección estadística.

Tabla 12 – Distribución de las secciones estadísticas y de la población residente respectiva por clase de capacidad de suporte en el municipio de Setúbal y en la AML

Clase de capacidad de suporte	AML		Setúbal		
	N.º	%	N.º	%	
Muy reducida	Secções	149	3,3	11	5,8
	Hab.	90845	3,2	5806	4,8
Reduzida	Secções	163	3,6	17	8,9
	Hab.	102358	3,6	12078	10,0
Moderada	Secções	376	8,3	27	14,0
	Hab.	263223	9,3	18545	15,3
Elevada	Secções	2525	55,9	69	36,0
	Hab.	1638850	58,1	46941	38,7
Muy elevada	Secções	1308	29	68	35,4
	Hab.	726600	25,8	37815	31,2
Total	Secções	4521	100	192	100
	Hab.	2821876	100	121185	100

Por lo que respecta al mapeo de las puntuaciones de cada componente principal (Figura 11), los dos componentes principales (FAC1 y FAC2) muestran patrones espaciales distintos.

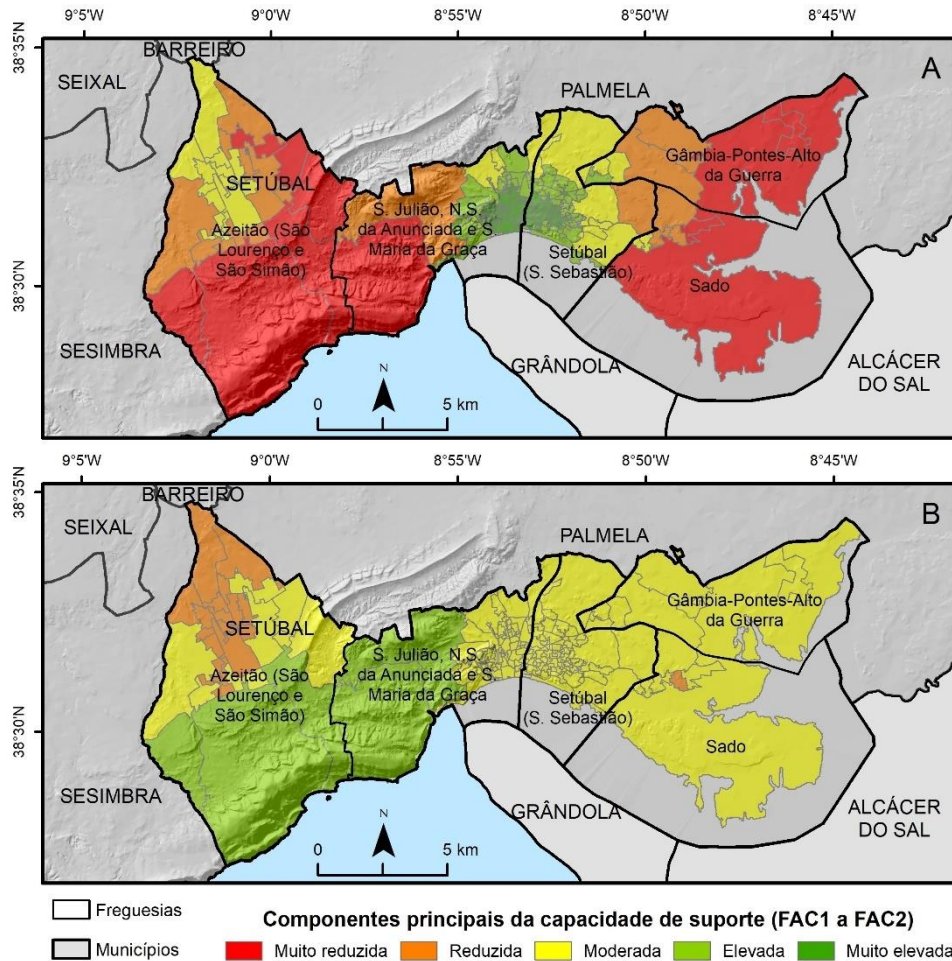


Figura 11 – Puntuaciones de los principales componentes de la capacidad de soporte del municipio de Setúbal, a nivel de sección estadística: cobertura por funciones y servicios vitales - FAC1 (A) y potencial de alojamiento temporal - FAC2 (B). Clasificación según la desviación estándar.

El componente principal más explicativo, que agrega la mayor parte de las variables (véase la Tabla 11), refleja la concentración en la ciudad de Setúbal de la mayor parte de las infraestructuras y equipamientos considerados (en los ámbitos de la sanidad, la protección civil y la seguridad), así como de los establecimientos que suministran productos de primera necesidad (alimentos, medicamentos y combustible). Este patrón espacial justifica que este componente principal explique el 54,7% de la varianza, y que las secciones estadísticas mejor cubiertas sean las situadas en la ciudad de Setúbal y, en menor medida, en Azeitão. El segundo

componente muestra un patrón espacial que refleja principalmente el comportamiento de una variable (cobertura de los establecimientos hoteleros para el alojamiento temporal), por lo que sólo explica el 11,1% de la varianza, y refleja la localización de las unidades hoteleras, ponderada por su número de unidades de alojamiento (Figura 11-B). Sin embargo, en el contexto de la AML, no hay secciones con una cobertura muy baja de este tipo de equipos.

3.1.3 Valor final de la vulnerabilidad social

La expresión final de la vulnerabilidad social resulta del producto entre la criticidad y la capacidad de soporte, como se describió en la ecuación 1. Los valores finales de vulnerabilidad en el municipio de Setúbal son más altos en las zonas suburbanas y rurales, donde la alta criticidad se solapa con la baja capacidad de soporte (Figura 12).

En este contexto, destacamos la mayor vulnerabilidad social en las freguesias más periféricas del municipio, como Gambia-Pontes-Alto da Guerra, Sado, el sector oeste de la freguesia de S. Julião, N. S. da Anunciada y S. Maria da Graça, y el sector este y sur de la freguesia de Azeitão (São Lourenço y São Simão).

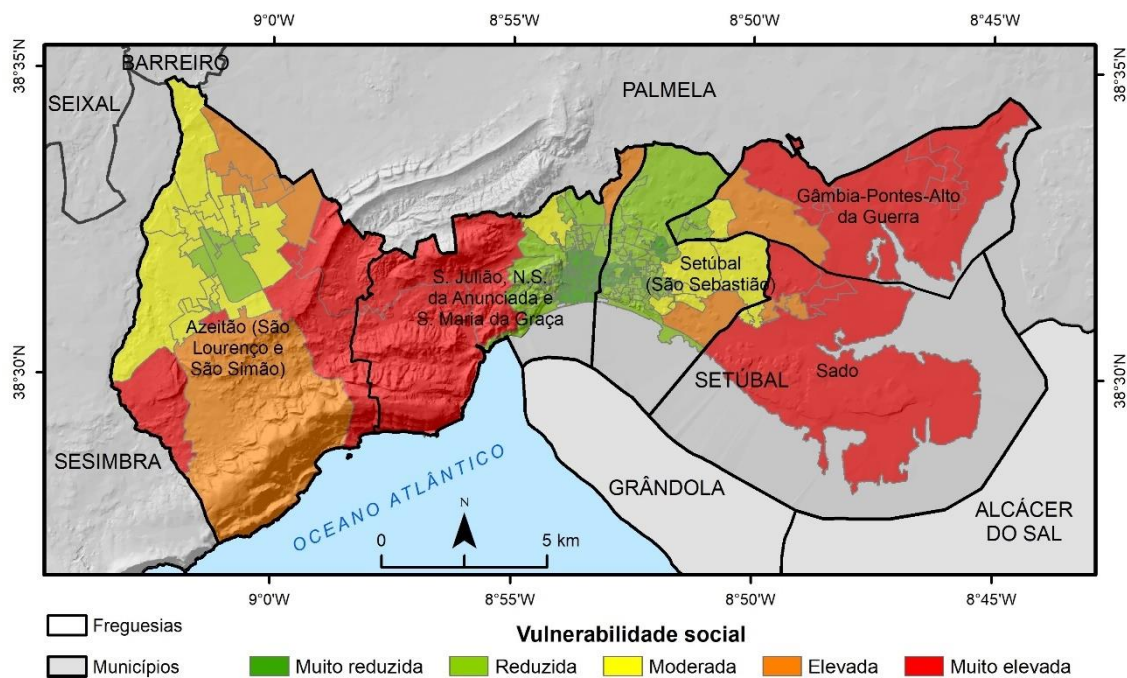


Figura 12 – Vulnerabilidade social en el municipio de Setúbal por sección estadística.

Comparando el contexto de vulnerabilidad social en Setúbal con el observado en la ZMT (Tabla 13) se observa que el número de secciones estadísticas y el número de habitantes que viven en secciones con muy baja VS es muy similar: 26,5% de las secciones en la ZMT y 26,6% en Setúbal, para una población residente en las mismas secciones (con la salvedad anterior) del 25,1% del total en la ZMT y del 23,5% del total en Setúbal. Las clases de SV alto y muy alto están representadas en el 11,5% de las secciones de Setúbal, mientras que el AML registra sólo el 6,2%, lo que corresponde a una proporción de población residente del 11,4% y el 6,1%, respectivamente.

Tabla 13 – Distribución de las secciones estadísticas y de la respectiva población residente por clase de vulnerabilidad social en el municipio de Setúbal y en el AML

Clase de vulnerabilidad social		AML		Setúbal	
		N.º	%	N.º	%
Muy reducida	Secciones	1196	26,5	51	26,6
	Hab.	708866	25,1	28482	23,5
Reducida	Secciones	2683	59,4	95	49,5
	Hab.	1698586	60,2	62398	51,5
Moderada	Secciones	361	8	24	12,5
	Hab.	242072	8,6	16517	13,6
Elevada	Secciones	136	3,0	9	4,7
	Hab.	84511	3	6455	5,3
Muy elevada	Secciones	145	3,2	13	6,8
	Hab.	87841	3,1	7333	6,1
Total	Secciones	4521	100	192	100
	Hab.	2821876	100	121185	100

3.1.4 Recomendaciones finales

La evaluación de la criticidad en el municipio de Setúbal permitió identificar áreas particularmente críticas del municipio, con alto detalle geográfico, debido a las características sociodemográficas de su población residente. A menudo se observa que, de forma espacialmente contigua, coexisten contextos de alta y baja criticidad, pertenecientes a la misma parroquia e incluso al mismo barrio. La metodología basada en el Análisis de Componentes Principales de un amplio conjunto inicial de variables condujo a la identificación de cuatro dimensiones explicativas de la criticidad, relacionadas principalmente con la situación laboral y las cualificaciones (FAC1), la edad, el género y los contextos urbanos

desfavorecidos (FAC2), las condiciones de la vivienda (FAC3) y la estructura familiar (FAC4).

Es importante que las políticas públicas regionales, municipales y locales -principalmente en los ámbitos de la acción social, el envejecimiento activo, el urbanismo, la educación, el empleo y la protección civil- consideren la configuración detallada de los valores obtenidos en cada una de estas dimensiones a la hora de definir sus estrategias y medidas de actuación. Sólo a través de la acción concertada de los distintos ámbitos pueden conciliarse los objetivos de sostenibilidad social y resiliencia ante las catástrofes (ya sean catástrofes recurrentes de alta probabilidad y/o catástrofes de altas consecuencias y baja probabilidad derivadas de fenómenos extremos).

La capacidad de soporte denota una alta concentración de funciones proporcionadas por el Estado, así como de servicios privados relevantes para el mantenimiento y la restauración de las funciones vitales y esenciales en las fases de ocurrencia y post-catástrofe. Como es evidente que la ubicación de estos equipamientos sigue una lógica de optimización del socorro al mayor número de personas en unos casos (instalaciones sanitarias, parques de bomberos o comisarías de la PSP y puestos territoriales de la GNR, por ejemplo), y una lógica de mercado en otros (gasolineras, establecimientos de abastecimiento de alimentos y farmacias, por ejemplo), será función de los agentes y cuerpos de protección civil planificar la gestión de la emergencia de forma que se garantice la reducción de los efectos de la concentración actual.

La relación entre criticidad y capacidad de soporte conduce, principalmente en la ciudad de Setúbal, a una marcada atenuación de los valores de vulnerabilidad social. A pesar de los bajos niveles de vulnerabilidad resultantes, se debe hacer hincapié en la expresión de la criticidad y en el mapeo individual de las puntuaciones de los cuatro componentes principales (FAC1 a FAC4), sin centrarse únicamente en los resultados finales de la vulnerabilidad social.

3.2 Vulnerabilidad física de los edificios del municipio de Setúbal

3.2.1 Características de los edificios expuestos a movimientos de ladera

En el municipio de Setúbal se identificaron 193 edificios residenciales expuestos al peligro de inestabilidad de los taludes.

La figura 13 representa el porcentaje de edificios expuestos al peligro de inestabilidad de laderas en el municipio de Setúbal por clase en cada variable. La clase de material de construcción dominante es el ladrillo y la piedra, seguidos del hormigón armado, que corresponden al 66% y al 30% de los edificios expuestos, respectivamente. En cuanto a los edificios con estructura de refuerzo, el 45,5 % de ellos se caracterizan por la existencia de muros de mampostería con placa y el 29,8 % de los edificios están contruidos con una estructura de refuerzo de hormigón armado. Sólo el 24,6% de los edificios expuestos no tienen estructura de refuerzo y el 4,2% están contruidos en adobe u otros materiales (madera, metal).

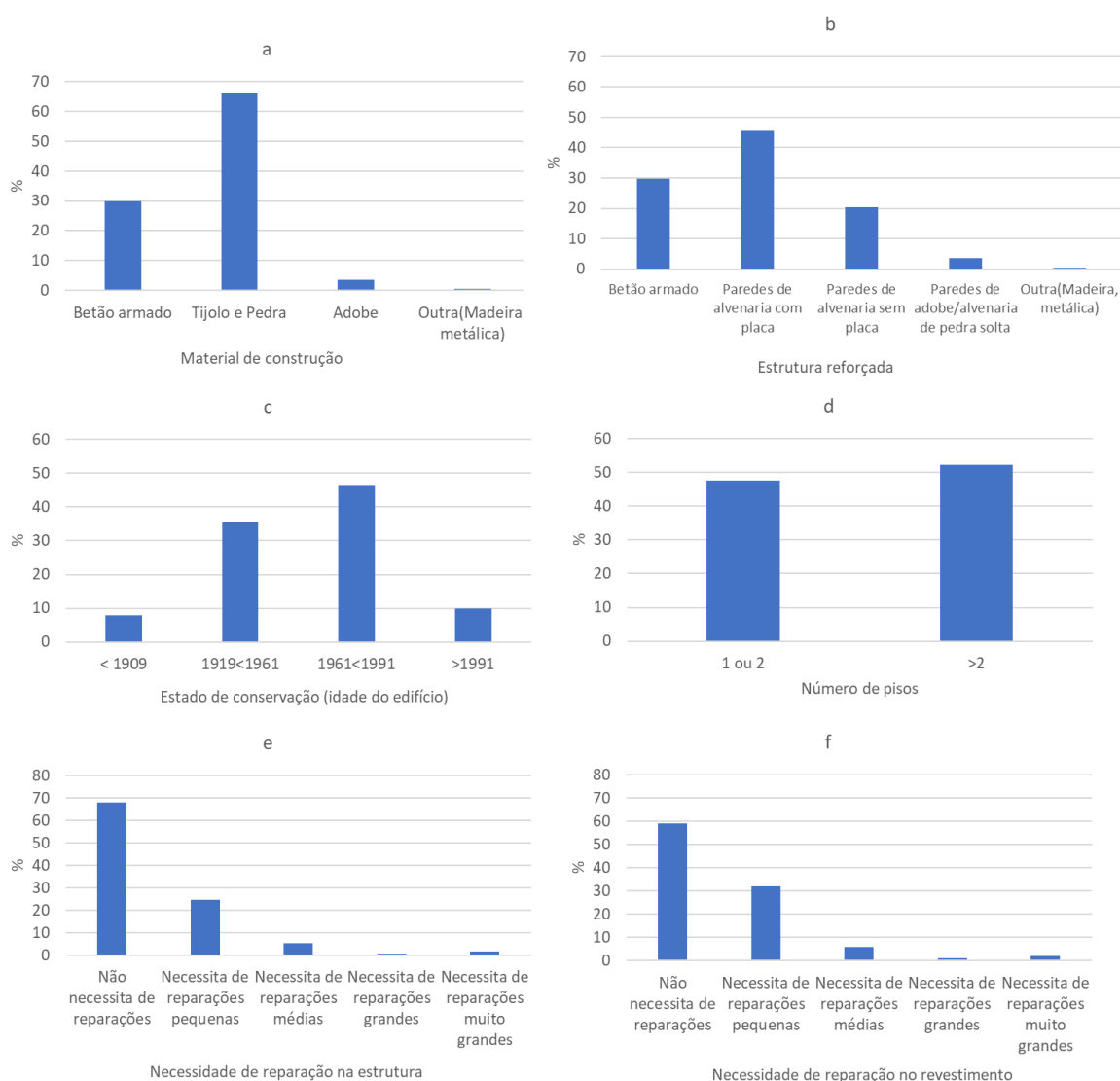


Figura 13 – Clases de variables (en %) utilizadas en la evaluación de la vulnerabilidad física de los edificios a los movimientos de ladera en el municipio de Setúbal: a - material de construcción; b - estructura reforzada; c - estado de conservación; d - número de plantas; e - necesidad de reparación de la estructura; f - necesidad de reparación del revestimiento.

En Setúbal, el 46,6% de los edificios expuestos al movimiento de ladera se construyeron en el período comprendido entre 1961 y 1990 y el 35,6% entre 1919 y 1960, y el 52,4% de los edificios tienen más de dos plantas.

En su mayoría, los edificios expuestos no necesitan reparaciones o necesitan reparaciones menores en la estructura y el revestimiento.

3.2.2 Vulnerabilidad física de los edificios expuestos a movimientos de ladera

En el escenario de 1 m de profundidad de la superficie de falla, la vulnerabilidad física de los edificios expuestos al movimiento de la pendiente varía entre 0,28 y 0,65, con una media de 0,38. La Figura 14 representa la distribución espacial de la vulnerabilidad física de los edificios en este escenario, donde se puede comprobar que los edificios con mayor vulnerabilidad física se encuentran en la parroquia de Setúbal (São Sebastião, N. S. Anunciada y Sta. Maria da Graça).

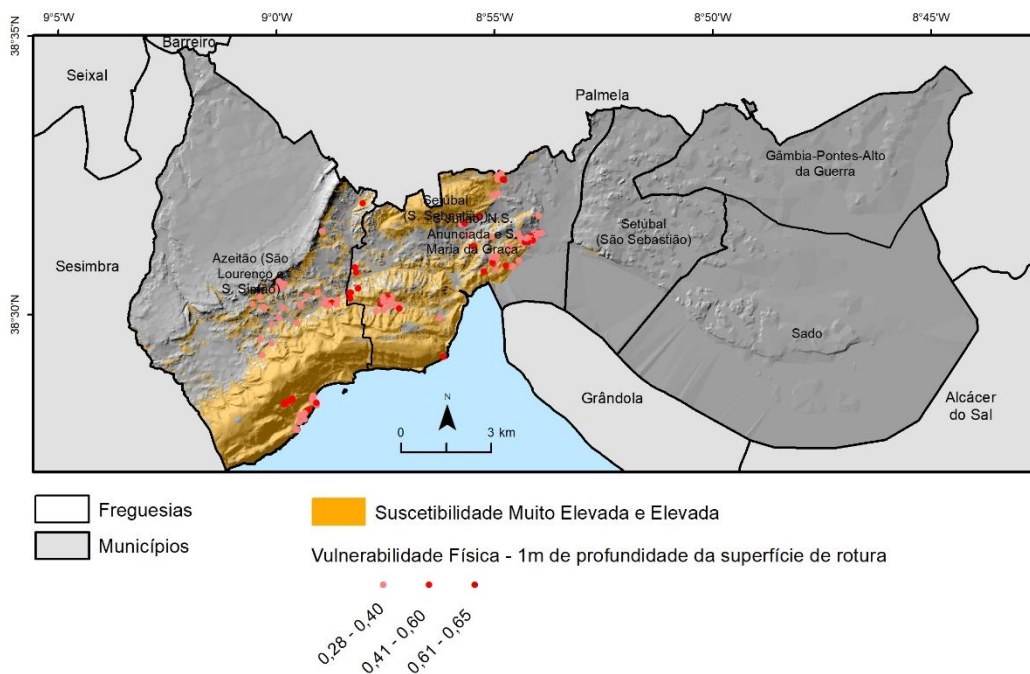


Figura 14 – Vulnerabilidad física de los edificios expuestos a movimientos de ladera en el municipio de Setúbal, en el escenario de 1 m de profundidad de la superficie de rotura.

En el escenario de 0,5 m de altura de material acumulado, la vulnerabilidad física de los edificios expuestos a movimientos de ladera varía entre 0,15 y 0,46, con una media de 0,23. La Figura 15 representa la distribución espacial de la vulnerabilidad física de los edificios en este escenario, donde se puede comprobar que los edificios con mayor vulnerabilidad física se encuentran también en la parroquia de Setúbal (São Sebastião, N. S. Anunciada y Sta. Maria da Graça).

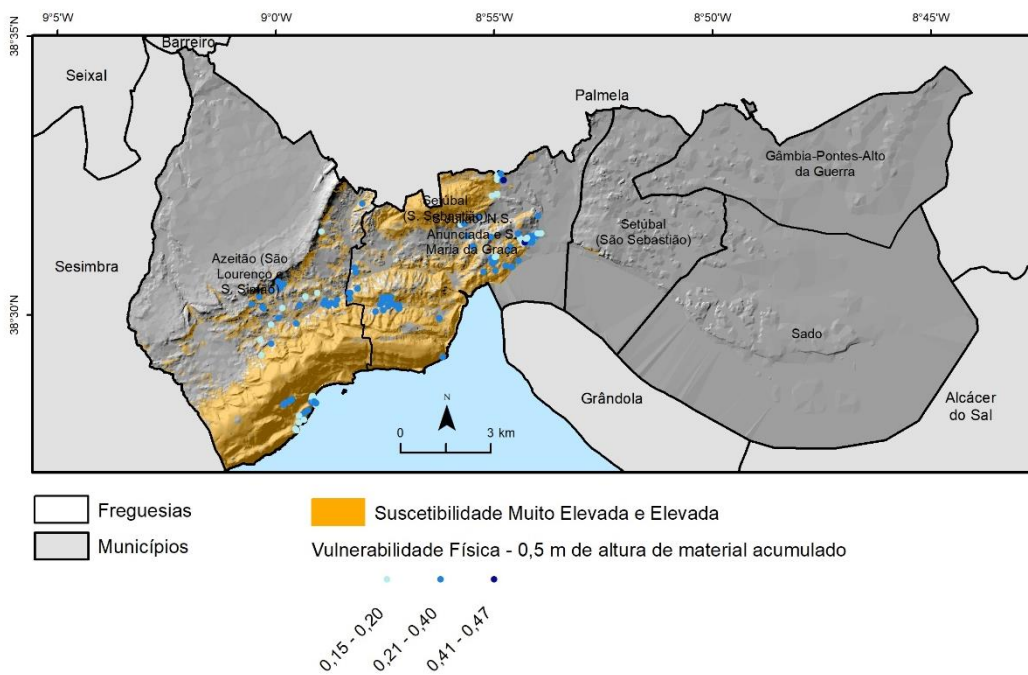


Figura 15 – Vulnerabilidad física de los edificios expuestos a movimientos de ladera en el municipio de Setúbal, en el escenario de 0,5 m de altura de material acumulado.

La Figura 16 representa las clases de vulnerabilidad física en quintiles de los edificios expuestos a los movimientos de ladera en el municipio de Setúbal en ambos escenarios analizados. Se puede observar que la gran mayoría de los edificios se encuentran en la clase de vulnerabilidad entre 0,21 y 0,4.

En general, los valores de vulnerabilidad física son bajos, lo que significa que no se espera que haya una pérdida total de los edificios, teniendo en cuenta la magnitud de los movimientos de la ladera y la resistencia de los edificios a sufrir daños, tanto si están situados en la zona de ruptura como al pie de un desprendimiento.

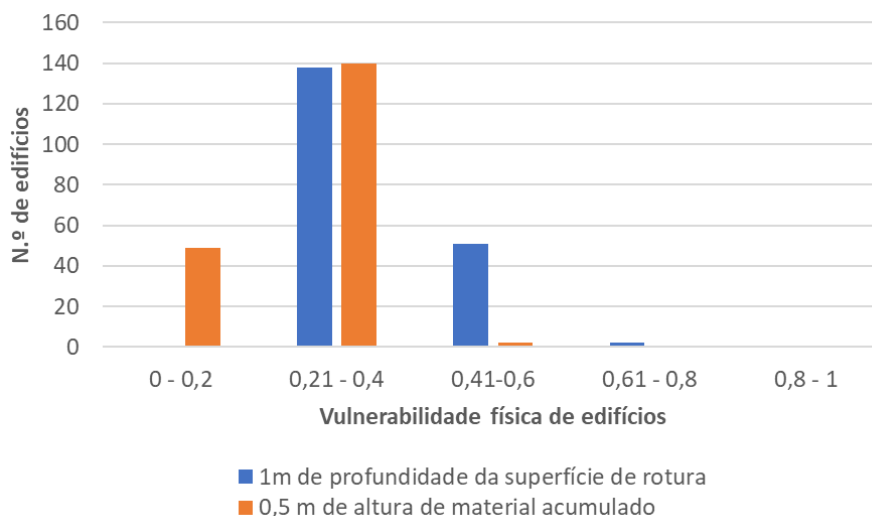


Figura 16 – Clases de vulnerabilidad física de los edificios expuestos a movimientos de ladera en el municipio de Setúbal en los dos escenarios analizados.

3.2.3 Vulnerabilidad física de las carreteras del municipio de Arruda dos Vinhos

3.2.3.1 Características de las carreteras expuestas a movimientos de ladera

La exposición de las carreteras a los movimientos de ladera se presenta sólo para el área del municipio de Arruda dos Vinhos, perteneciente a la cuenca del río Grande da Pipa (RGP). La exposición se considera para dos escenarios de inestabilidad: desprendimientos profundos y desprendimientos superficiales.

La exposición se define por la presencia de los elementos expuestos en las zonas clasificadas con alta y muy alta susceptibilidad a los desprendimientos profundos (Figura 17) y a los desprendimientos superficiales (Figura 18).

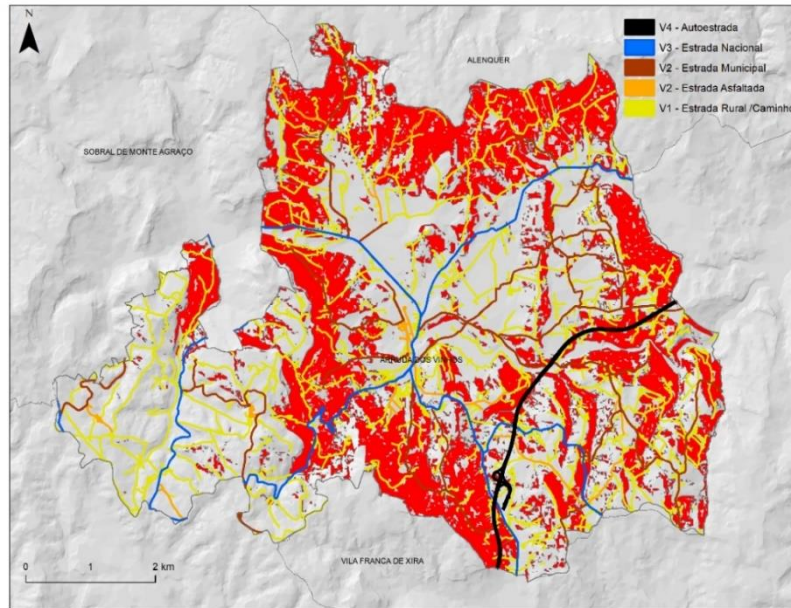


Figura 17 – Susceptibilidad de alta a muy alta a desprendimientos profundos (en rojo) y distribución de los diferentes tipos de carreteras en la zona de estudio.

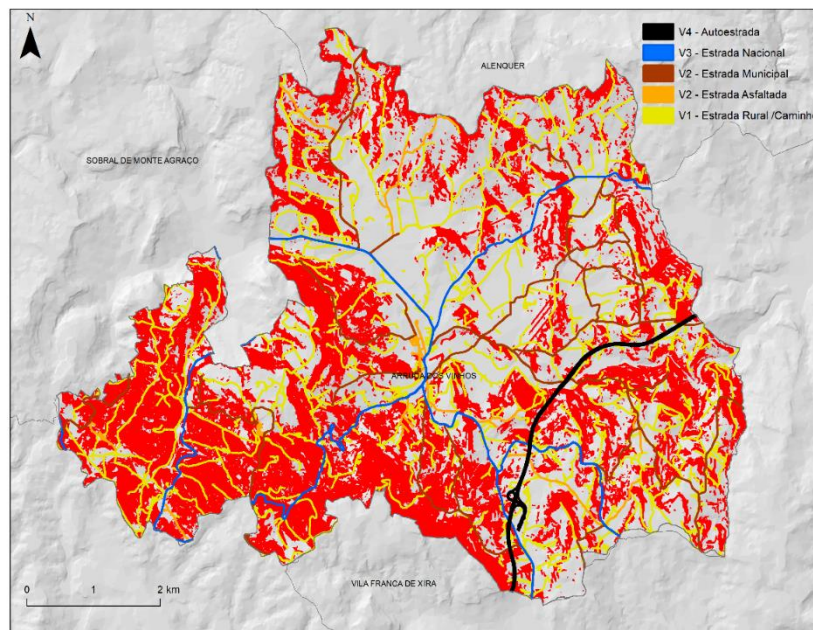


Figura 18 – Susceptibilidad alta a muy alta a los desprendimientos (en rojo) y distribución de los diferentes tipos de carreteras en la zona de estudio.

La Tabla 14 resume la exposición de los distintos tipos de carreteras a los desprendimientos profundos. Las autopistas (V4) tienen 4.006 m (36,3%) de su longitud en zonas susceptibles de desprendimiento, mientras que las

carreteras nacionales (V3) tienen 8.377 m (30,3%). Hay que tener en cuenta que los tramos de autopista que se apoyan en viaductos, y que pueden haber sido clasificados como expuestos a desprendimientos profundos y superficiales, sólo están realmente expuestos, según estos criterios, si sus pilares están situados en zonas de susceptibilidad alta a muy alta. Las carreteras asfaltadas (V2) y los caminos rurales/senderos (V1) también destacan por las mayores extensiones de exposición a desprendimientos profundos (18.871 m (28,6 %) y 74.973 m (33,1 %), respectivamente).

La Tabla 15 resume la exposición de los diferentes tipos de carreteras a los desprendimientos superficiales y muestra que 5.475 m (46,3%) del trazado de la autopista (V4) se encuentran en zonas clasificadas con una susceptibilidad de alta a muy alta a los movimientos superficiales. Las carreteras nacionales (V3) tienen 7.221 m (26,5%), de su recorrido en zonas más susceptibles. Las carreteras asfaltadas (V2) y los caminos rurales/senderos (V1) tienen las mayores extensiones en zonas susceptibles (15.492 m (24,1%) y 66.486 m (29,7%), respectivamente).

Tabla 14 – Exposición por tipología de carretera a desprendimientos profundos en la zona del municipio de Arruda dos Vinhos situada en la cuenca del RGP

	Autopista (V4)			Carretera Nacional (V3)			Carretera Asfaltada (V2)			Carretera rural/Caminho (V1)		
	No susceptible	Susceptible	% Susceptible	No susceptible	Susceptible	% Susceptible	No susceptible	Susceptible	% Susceptible	No susceptible	Susceptible	% Susceptible
Longitud (m)	7.030	4.006	36,3	19.313	8.377	30,3	47.121	18.871	28,6	151.716	74.973	33,1
Área (m ²)	144.806	66.222	31,4	106.173	37.761	26,2	225.295	82.641	26,8	572.678	229.623	28,6

Tabla 15 – Exposición por tipología de carretera a los desprendimientos en la zona del municipio de Arruda dos Vinhos situada en la cuenca del RGP

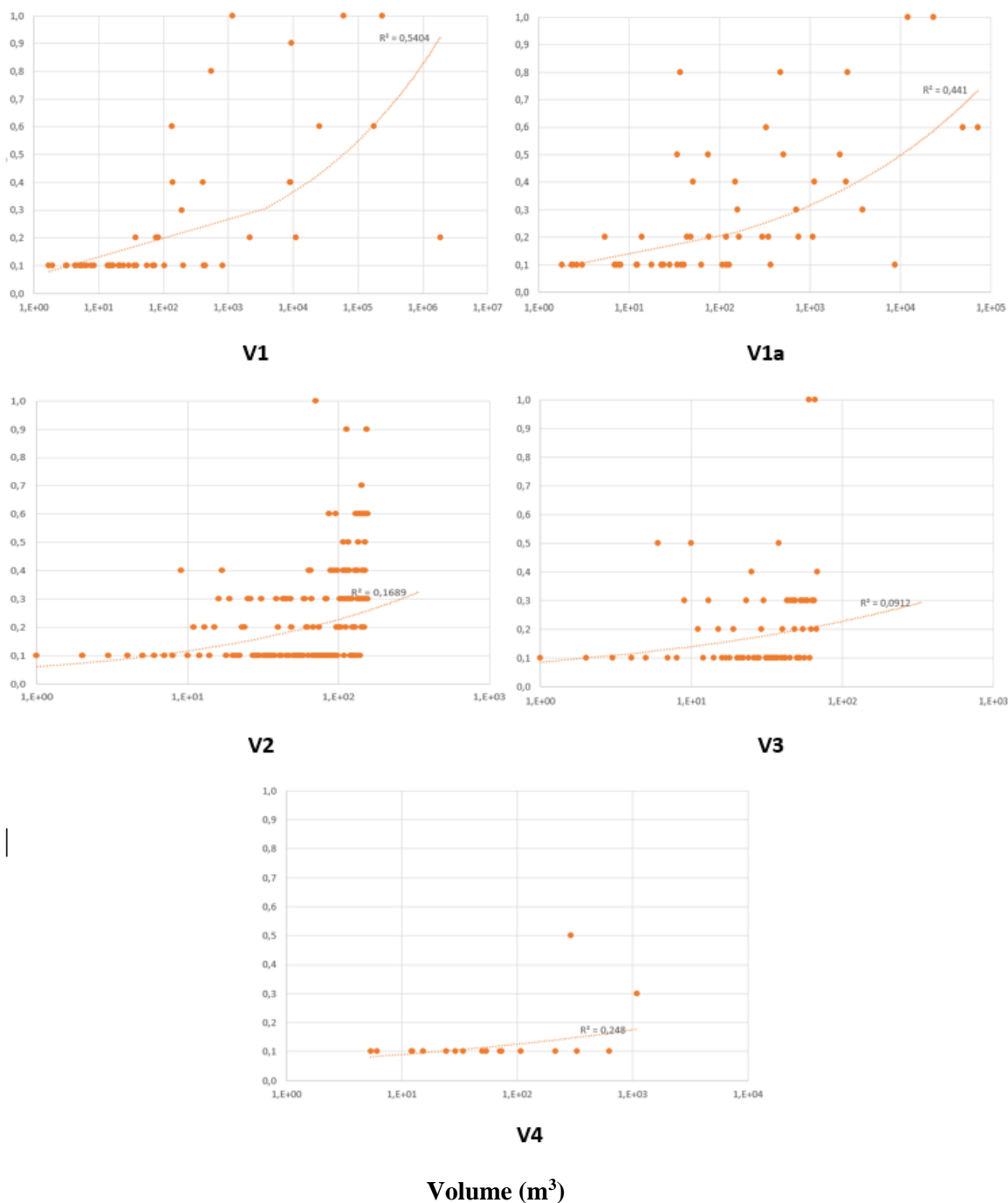
	Autopista (V4)			Carretera Nacional (V3)			Carretera Asfaltada (V2)			Carretera rural/Caminho (V1)		
	No susceptible	Susceptible	% Susceptible	No susceptible	Susceptible	% Susceptible	No susceptible	Susceptible	% Susceptible	No susceptible	Susceptible	% Susceptible
Longitud (m)	6.342	5.475	46,3	19.996	7.221	26,5	48.863	15.492	24,1	157.501	66.486	29,7
Área (m ²)	112.778	98.252	46,6	110.141	33.966	23,6	245.721	62.260	20,2	594.556	208.719	26,0

3.2.4 Vulnerabilidad física de las carreteras expuestas a movimientos de ladera

A partir de los resultados obtenidos, se observa que los caminos rurales (V1, Figura 19) alcanzan el mayor valor de grado de pérdida cuando se ven afectados por desprendimientos con un volumen superior a 1.000 m³ (una profundidad de la superficie de ruptura de 1,9 m). Los dos desprendimientos que afectaron a este tipo de carreteras corresponden a dos desprendimientos rotacionales profundos (239.017 m³ y 60.423 m³) que se produjeron durante las obras de construcción de la autopista A10, en la subcuenca del Laje. Dado que la estructura de la autopista no estaba construida en el momento en que se produjeron los movimientos de ladera, se asumió que se trataba de una carretera rural (V1a, Figura 19).

En el caso de los desprendimientos más pequeños, es decir, con un volumen inferior a 100 m³ (profundidad de la superficie de ruptura de 1 m), el grado de pérdida no superó el 0,2. Las trayectorias (V1a, Figura 19) alcanzan el valor más alto de grado de pérdida (1, nivel de daño D5), sólo en los deslizamientos con más de 10.000 m³ (profundidad de la superficie de ruptura de 3,7 m), uno de los casos registrados en las proximidades de Carnota (23.080 m³) y el otro en Louriceira (12.104 m³). Estos resultados son sorprendentes si se comparan con lo que cabría esperar, ya que la resistencia estructural de los caminos es sustancialmente menor que la de las carreteras rurales. La razón parece ser que la mayoría de los registros de daños en los senderos están relacionados con el impacto de los movimientos de la pendiente que se producen en el talud superior del sendero, generando normalmente valores de grado de pérdida que no superan el 0,8. Aun así, se puede comprobar que el grado de pérdida de 0,8 puede ser alcanzado por el impacto de desprendimientos de menos de 100 m³ (profundidad de la superficie de ruptura de 1 m), lo que atestigua la menor resistencia de los caminos en relación con las carreteras rurales.

Tanto las carreteras municipales (V2, Figura 19) como las nacionales (V3, Figura 19) alcanzan el valor más alto de grado de pérdida (D5), en con movimientos de ladera superiores a 100 m³ y 1.000 m³, respectivamente. En las carreteras municipales (V2), se registró un grado máximo de pérdida de 1 en la subcuenca de Santana da Carnota, por un deslizamiento con un volumen de sólo 196 m³ (Figura 20).



● Grado de Pérdida Curva de Tendencia

Figura 19 – Grado de pérdida por tipo de carretera según la magnitud del movimiento del talud (volumen - m³): Caminos rurales (V1); Sendero (V1a); Carretera municipal (V2); Carretera nacional (V3); Autopista (V4).



Figura 20 – Deslizamiento de tierra rotacional cerca de Pedra do Ouro, subcuenca de Santana da Carnota.

En las carreteras nacionales (V3, Figura 19), los desprendimientos con un grado de pérdida de 1 son dos valores atípicos y tienen un volumen de 60.642 m³ y 2.897 m³. Los registros existentes en la cuenca del río Grande da Pipa muestran que el grado de pérdida en las carreteras nacionales debido a los deslizamientos no suele superar el 0,6.

En el caso de las autopistas (V4, Figura 19), y según los registros de daños disponibles, nunca se alcanzó el valor de grado de pérdida 1 (D5). Sólo se verificó un nivel de daño significativo (D3) y un grado de pérdida de 0,5, muy probablemente sobrestimado, ya que se registró en el talud inferior de un carril del cruce de acceso a la autopista. Esencialmente, el grado de pérdida registrado es de 0,1, asociado a eventos de cesión de la parte superior del talud de la autopista, alcanzando el depósito sólo el borde de la plataforma asfáltica. Los valores de grado de pérdida superiores a 0,1 fueron causados por desprendimientos de más de 100 m³.

La Figura 21 y la Figura 22 presentan los resultados de la espacialización de la vulnerabilidad física de las carreteras para los dos tipos de movimiento

- superficial y profundo, respectivamente - en el municipio de Arruda dos Vinhos.

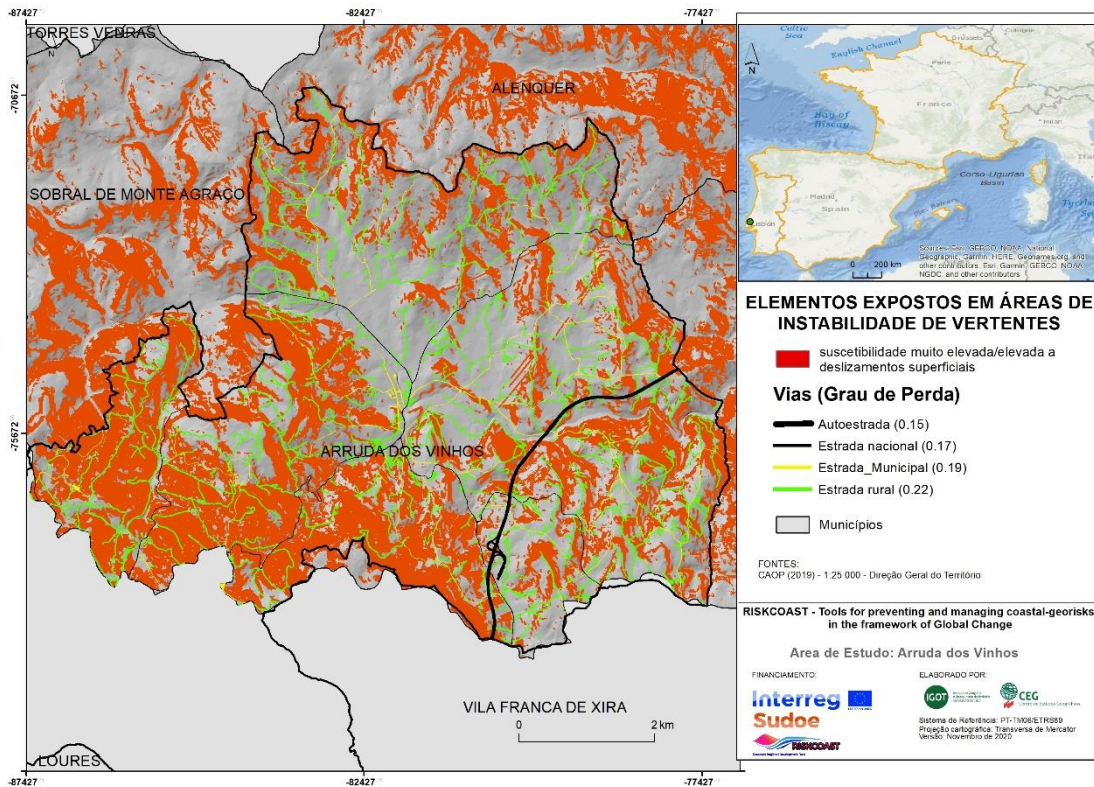


Figura 21 – Elementos expuestos (carreteras) en zonas de inestabilidad de laderas y su grado de pérdida por desprendimiento.

Teniendo en cuenta las similitudes entre las tipologías V1 y V1a (carreteras y caminos rurales, respectivamente), éstas se generalizaron en la misma categoría, a efectos de la espacialización de la vulnerabilidad. Para ello, se adoptó un enfoque más conservador y se atribuyó el valor más alto del grado de pérdida, en este caso para los caminos (0,22 para los desprendimientos).

Cabe señalar que los valores del grado de pérdida calculados y presentados aquí se limitan a los datos obtenidos para la zona de estudio, dentro del ámbito de este trabajo. Sin embargo, se sabe empíricamente, a través de las observaciones realizadas en la región norte de Lisboa, que el grado de pérdida puede ser total, independientemente del tipo de vía, para los movimientos de ladera con profundidad de la superficie de fallo superior a 5 m.

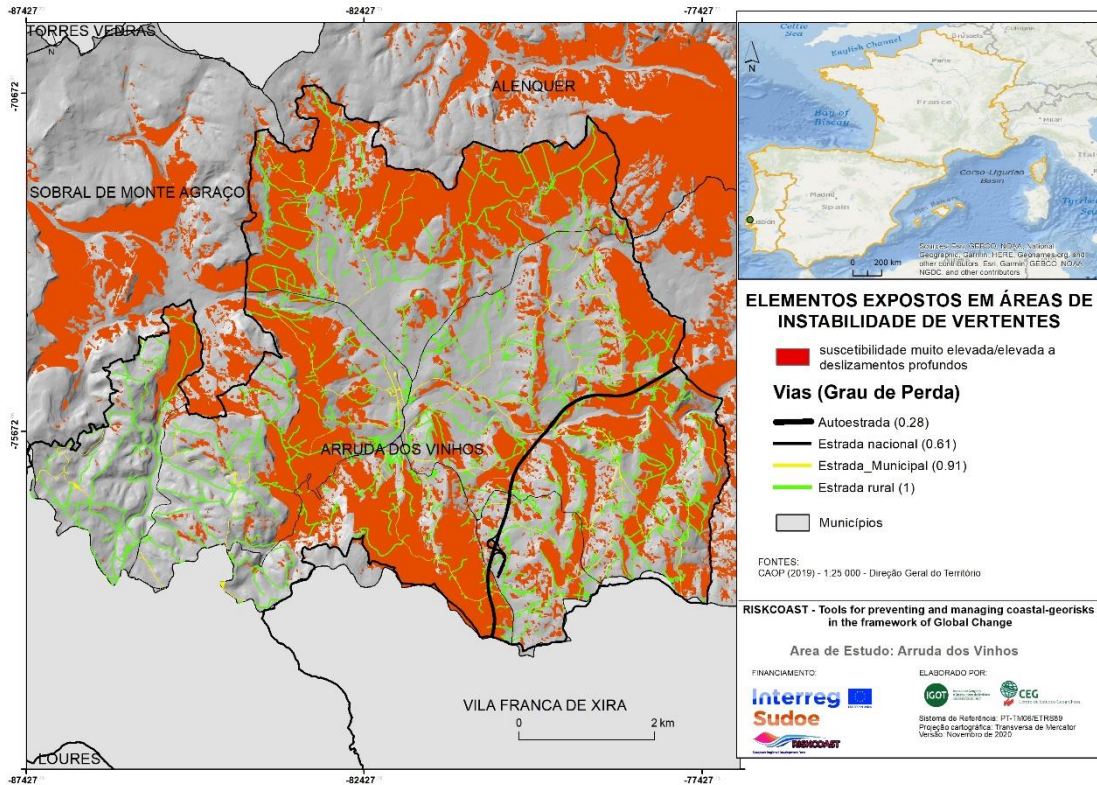


Figura 22 – Elementos expuestos (carreteras) en zonas de inestabilidad de las laderas y su grado de pérdida por desprendimientos profundos.

4 CONCLUSIONES

La evaluación de la vulnerabilidad social llevada a cabo en el municipio de Setúbal proporciona una imagen detallada de las zonas en las que el impacto de los eventos peligrosos, con mayor o menor magnitud y recurrencia, puede tener mayores efectos negativos, pero también proporciona una imagen de las zonas mejor cubiertas por los equipos y servicios que favorecen las actividades de contingencia, el socorro inmediato y la recuperación posterior al desastre.

Los principales impulsores del componente de criticidad son la empleabilidad, la educación, la edad y las condiciones de vivienda. Las zonas más críticas se encuentran en el centro urbano de Setúbal, concretamente en Viso, Troino, Rua Senhor Jesus dos Aflitos y Casal das Figueiras, al este, y Camarinha y Bairro da Boavista al oeste. La capacidad de soporte revela, como se esperaba, una fuerte concentración de equipos y servicios en la ciudad de Setúbal. Es importante que, a nivel de la planificación de la protección civil de emergencia y, a medio y largo plazo, de las políticas sociales, educativas, sanitarias e incluso urbanísticas y de ordenación del territorio, se consideren estos resultados como elementos de apoyo a la toma de decisiones sobre las medidas para reducir el riesgo de catástrofes.

La vulnerabilidad de los edificios a los movimientos de ladera siguió un enfoque multicriterio y semicualitativo, en el que se definen variables o parámetros específicos para el tipo de riesgo (por ejemplo, la necesidad de reparaciones, el número de plantas, los materiales de la estructura y el revestimiento exterior o el periodo de construcción). Cuando se cruzan con la susceptibilidad, los resultados proporcionan una evaluación detallada de los edificios más propensos a sufrir daños en caso de movimiento de la pendiente. Especialmente, la exposición al peligro es mayor en la ciudad de Setúbal (parroquias de S. Julião, N. S. Anunciada y Sta. Maria da Graça). La vulnerabilidad física de los edificios a los movimientos de ladera es, en general, baja, destacando como variables en las que los indicadores son más desfavorables la antigüedad de los edificios (con más de un 40% de los edificios en zonas de alta y muy alta susceptibilidad construidos antes de 1960) y el material de construcción (con cerca de un 65% utilizando ladrillo y piedra).

La evaluación de la vulnerabilidad física de las carreteras a los desprendimientos en el municipio de Arruda dos Vinhos se basó en el

análisis de un conjunto de factores que se supone que condicionan el grado de pérdida del elemento expuesto, tales como (i) la resistencia estructural del elemento afectado; (ii) el tipo de movimiento del talud; (iii) la magnitud/intensidad del movimiento del talud; (iv) el espesor del material deslizado o la profundidad de la superficie de ruptura como indicador de la intensidad, o (v) la forma en que la masa deslizada afecta a la infraestructura. En este contexto, se ha desarrollado una propuesta para determinar el grado de pérdida en carreteras y edificios (Alves, 2018), contemplando marcadores únicos de deformación/pérdida de funcionalidad, tales como: (i) la apertura de grietas/fisuras de tracción en el pavimento de la carretera; (ii) el gradiente vertical de las fracturas en el pavimento de la carretera; (iii) la amplitud de ondulación del pavimento de la carretera; (iv) el tiempo de interrupción/acondicionamiento del tráfico; y (v) la pérdida de resistencia del soporte lateral de la carretera en el terraplén.

Se exploraron las relaciones entre la intensidad/magnitud de los movimientos del talud y el grado de pérdida para contemplar la resistencia estructural del elemento afectado (diferentes tipos de carreteras). Aunque se observó una tendencia a la disminución del grado de pérdida en función del aumento de la resistencia de las carreteras, según su tipología, también se observó una propensión al aumento del grado de pérdida en función de la magnitud (volumen) de los desprendimientos, independientemente de la tipología/resistencia de las carreteras. Además, la evidencia empírica acumulada en la Región Norte de Lisboa muestra que el grado de pérdida en las carreteras puede ser total, independientemente de la tipología de la carretera, para los deslizamientos de gran magnitud (por ejemplo, con profundidades superiores a 5 m). Esta conclusión también es válida para la vulnerabilidad física de los edificios, siempre en función del tipo de movimiento de la pendiente y del sector de ese movimiento que afecta al elemento expuesto.

5 BIBLIOGRAFÍA

Alexander, D. E. (2004) Vulnerability to landslide in Glade, T; Anderson M.; Crozier, M. (eds.) *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester, 175-198.

Alves, C. (2018) Padrões de vulnerabilidade estrutural em estradas e edifícios associados à ocorrência de movimentos de vertente. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território, IGOT, ULisboa.

Buckle, P.; Mars, G.; Smale, S. (2000) New approaches to assessing vulnerability and resilience. *Aust J Emerg Manag.* 8–14.

Chen, W.; Cutter, S.L.; Emrich, C.T.; Shi, P. (2013) Measuring Social Vulnerability to Natural Hazards in the Yangtze River Delta Region, China. *International Journal of Disaster Risk Science*, 4(4), p. 169-181.

Ciurean, R. L.; Schröter, D.; Glade, T. (2013) Conceptual Frameworks of Vulnerability Assessments for Natural Disasters Reduction, in *Approaches to Disaster Management – Examining the Implications of Hazards, Emergencies and Disasters*, edited by: Tiefenbacher, J., InTech, Rijeka, 3–32, 2013.

Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996) Landslide types and processes in Turner, A. K.; Schuster, R. L. (Eds.), *Landslides investigation and mitigation*. Transportation Research Board. National Academic Press, Washington D. C. Special Report 247: 36 – 75.

Cutter, S.L.; Boruff, B.; Sherley, W.L. (2003) Social Vulnerability to Environmental Hazards, *Social Science Quarterly*, 84(2), p. 242-261.

Fell, Robin, Hartford, D. (1997) Landslide risk management. In: Cruden, D., Fell, R. (Eds.), *Landslide Risk Assessment*. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment. A.A. Balkema, Honolulu, pp. 51–119.

Ferreira, T. M.; Santos, P. P. (2020) An Integrated Approach for Assessing Flood Risk in Historic City Centres. *Water*, 12(6), 1648.

Garcia, R. A. C. (2012). Metodologias de Avaliação da Perigosidade e Risco associado a movimentos de vertente. Aplicação na bacia do rio

Alenquer. Dissertação de doutoramento em Geografia na Especialidade em Geografia Física no Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Glade, T. (2003). *Vulnerability Assessment in Landslide Risk Analysis*. Die Erde. 130 Glade, T.; Anderson, M.G.; Crozier, M.J. (Eds.), (2005). *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester.

Guillard-Gonçalves, C.; Zêzere, J. L.; Pereira, S.; Garcia, R. A. C. (2016) *Assessment of physical vulnerability of buildings and analysis of landslide risk at the municipal scale: application to the Loures municipality, Portugal* *Natural Hazards Earths System Sciences*, 16, 311–331, 2016.

Guzzetti, F.; Ardizzone, F.; Cardinali, M.; Rossi, M.; Valigi, D. (2009). *Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy*. *Earth and Planetary Science Letters*. 279: 222 – 229.

IAEG-Commission on Landslides, 1990. *Suggested nomenclature for landslides*. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology* 41, 13–16.

INE (2011) *XV Recenseamento Geral da População. V Recenseamento Geral da Habitação*, Instituto Nacional de Estatística.

Jakob, M.; Stein, D.; Ulmi, M. (2012). *Vulnerability of buildings to debris flow impact*. *Natural Hazards Earths System Sciences* 60:241–261.

Kaiser, H.F. (1974) *An index of factorial simplicity*. *Psychometrika*, 39(1), p. 31–36.

Lateltin, O.; Haemmig, C.; Raetzo, H.; Bonnard, C. (2005) *Landslide risk management in Switzerland*. *J Int Consort Landslides* 2(4):313–320.

Leóne, F. (1996). *Concept de Vulnérabilité Appliqué à l'Évaluation des Risques Générés par les Phénomènes de Mouvement de Terrain*. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I Sciences, Techniques et Médecine. Orléans. Editions BRGM, Orléans.

Malheiros, J., Zêzere, J.L., Ludovici, A., Pereira, S., Oliveira, S., Malheiros, M., 2018. *Um Século de Respostas Habitacionais Públicas a Catástrofes. Habitação Cem Anos de Políticas Públicas Em Portugal 1918–2018*, pp. 365–405.

Mendes, J.M.; Tavares, A.O.; Cunha, L.; Freiria, S. (2010) Social vulnerability to natural and technological hazards: the relevance of scale. In R. Briš, C. Guedes Soares & S. Martorell (Org.) Reliability, Risk and Safety. Vol. 1, Theory and Applications, CRC Press, Leiden, pp. 445-451.

Mendes, J. M.; Tavares, A. O.; Santos, P. P. (2019) Social vulnerability and local level assessments: a new approach for planning. International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment, 11(1), p. 15–43.

Oliveira, S.C.; Zêzere, J.L.; Garcia, R.A.C; Pereira, S. (2016) Padrão de deformação de movimentos de vertente em áreas periurbanas associados a eventos de instabilidade. International Conference on Urban Risks, Lisbon, 30 Junho-2 Julho 2016, ISBN: 978-989-95094-1-2, pp 363-370. <http://www.ceru-europa.pt/icur2016/>

Oliveira, S. C.; Zêzere, J. L.; Catalão, J.; Nico, G. (2015). The contribution of PSInSAR interferometry to landslide hazard in weak rock-dominated areas, Landslides, 12(4), 703– 719.

Oliveira, S. C. (2012). Instabilidade geomorfológica na bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos). Dissertação de Doutoramento em Geografia na especialidade de Geografia Física a apresentar ao Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa.

Papathoma-Köhle, M.; Neuhäuser, B.; Ratzinger, K.; Wenzel, H.; Dominey-Howes, D. (2007) Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. Natural Hazards Earths System Sciences, 7: 765 – 779.

Pereira, S.; Santos, P.P.; Zêzere, J.L.; Tavares, A.O.; Garcia, R.A.C.; Oliveira, S.C. (2020) A landslide risk index for municipal land use planning in Portugal. Science of the Total Environment 735 (2020) 139463.

Schmidtlein, M.C.; Deutsch, R.C.; Piegorsch, W.W.; Cutter, S.L. (2008) A Sensitivity analysis of the Social Vulnerability Index, Risk Analysis, 28(4), p. 1099-1114.

Silva, M.; Pereira, S. (2014) Assessment of physical vulnerability and potential losses of buildings due to shallow slides. Natural Hazards Earths System Sciences, 72(2), 1029– 1050.

Sterlacchini, S.; Akbas, S. O.; Blahut, J.; Mavrouli, O.; Garcia, C.; Quan Luna, B.; Corominas, J. (2014). Methods for the characterization of the

vulnerability of elements at risk. In *Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance* (233–273). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6769-0_8.

Uzielli, M.; Nadim, F.; Lacasse, S.; Kaynia, A. M. (2008) A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*, 102(3–4), 251–256.

van Westen, C. J.; van Asch, T. W. J.; Soeters, R. (2006). Landslide hazards and risk zonation - why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 65: 167 – 184.

Xofi, M. (2021) Evaluation of Exposure and Vulnerability Indicators for Assessing Multi-Hazard Risk in Urban Areas. *Advanced Master in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions*, Universidade do Minho.

Yin, K. L.; Yan, T. Z. (1988). Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In Bonnard, C. (Ed.), *Landslides, Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, 2, Balkema, Rotterdam, 1269–1272.

Záruba, Q.; Mencl, V. (1982). *Landslides and Their Control: Development in Geotechnical Engineering*. Elsevier, Amsterdam, 324.

Zêzere, J. L. (2002) Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2, 73–82, doi:10.5194/nhess2-73-2002.

Zêzere, J. L. (1997). *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Dissertação de doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa.

Zhou, Y.; Li, N.; Wu, W.; Wu, J.; Shi, P. (2014) Local spatial and temporal factors influencing population and societal vulnerability to natural disasters, *Risk Analysis*, 34(4), p. 614-639.