

Deliverable E 2.3.1: Informe técnico - riesgo actual y futuro en escenarios de cambio climático en el área de teste de Setúbal

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

Due date of deliverable: 30/09/2021

Actual submission date: 15/03/2022

Lead contractor for this deliverable: IGOT-ULISBOA

Autores

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



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. METODOLOGÍA	4
2.1 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD ACTUAL Y FUTURA.....	4
2.2 EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN	12
2.3 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDADES	13
2.4 ANÁLISIS DEL RIESGO	16
3. RESULTADOS.....	18
3.1 SUSCEPTIBILIDAD ACTUAL Y FUTURA	18
3.2 EXPOSICIÓN.....	28
3.3 VULNERABILIDAD	41
3.4 ANÁLISIS DEL RIESGO	44
4. CONCLUSIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA	51

1. INTRODUCCIÓN

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 mapas de peligros, vulnerabilidades y riesgos en las regiones costeras del Sudoe, adaptados a diferentes escenarios de riesgo futuros derivados del cambio climático.

El área de estudio de este informe corresponde al municipio de Setúbal, situado en la Área Metropolitana de Lisboa (Figura 1.). El objetivo principal de este informe técnico (E.2.3.1) es presentar un conjunto de procedimientos metodológicos para la evaluación del riesgo actual y futuro en escenarios de cambio climático, para un conjunto de procesos que respondan al factor de estrés climático: inestabilidad de taludes; inundaciones rápidas; inundaciones de estuarios; inundaciones costeras y rebases del oleaje; y erosión costera y retroceso de acantilados.

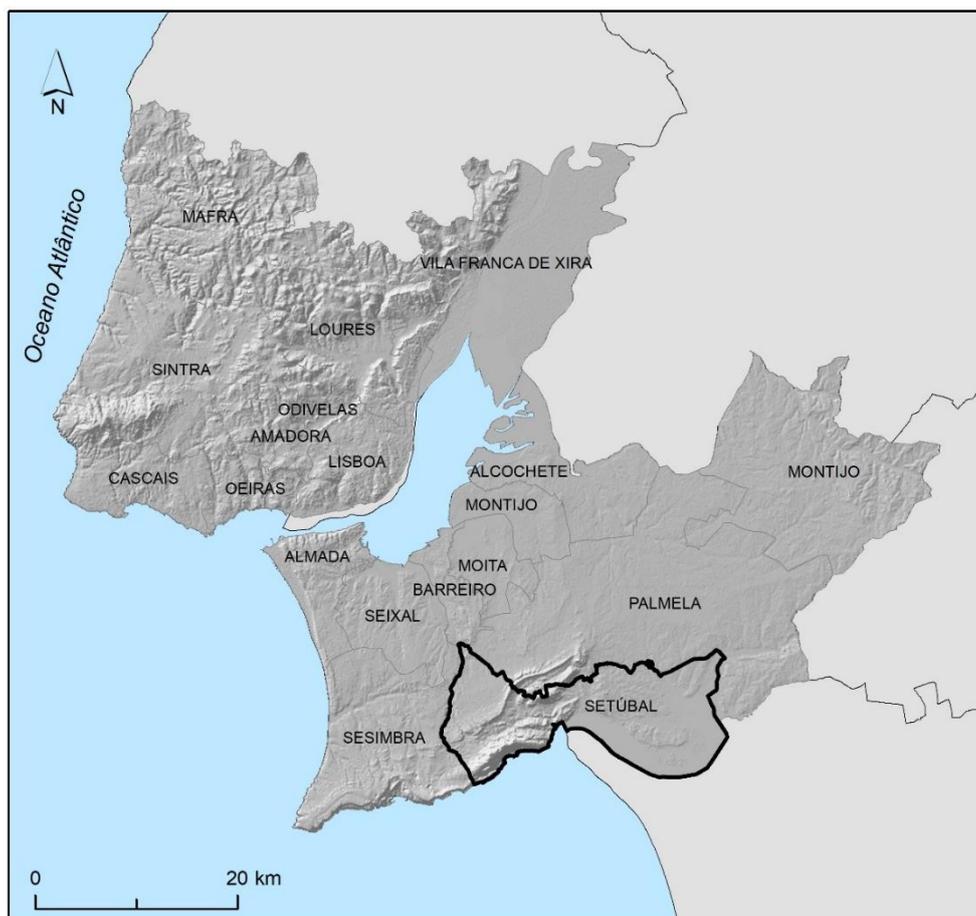


Figura 1. Marco geográfico del municipio de Setúbal, en la Área Metropolitana de Lisboa.

2. METODOLOGÍA

El análisis de peligros con estresor climático, actual y futuro, se implementó para un conjunto de procesos físicos con incidencia relevante en el territorio municipal, apoyados en la aplicación de métodos técnico-científicos reconocidos, ajustados a un análisis a escala municipal y a los datos científicos y literatura disponibles, habiéndose realizado por separado para cada tipo de proceso peligroso.

Como regla general, los peligros climáticos futuros se proyectaron para fines del siglo XXI y se ajustan de acuerdo con *los escenarios de las Vías de Concentración Representativa RCP 4.5 y RCP 8.5* (equivalentes a *las Vías Socioeconómicas Compartidas SSP2-4.5 y SSP5-8.5*, en la nomenclatura introducida en IPCC (2021)).

Sobre la base de la concentración actual de CO₂ de 400 ppm, el escenario RCP 4.5 presupone una trayectoria de aumento de la concentración atmosférica de CO₂ hasta 520 ppm en 2070, con una tasa de aumento más baja hasta 2100, mientras que el escenario RCP 8.5 presupone una trayectoria similar al escenario 4.5 de RCP para 2050, pero con un aumento intensificado en el período posterior, concentración de CO₂ de 950 ppm en 2100.

El mapeo de los peligros actuales se realizó a partir de la delimitación directa de las áreas afectadas por los procesos peligrosos considerados o utilizando métodos de zonificación indirecta, es decir, métodos cuantitativos o semicuantitativos que se basan en el análisis de las causas de los procesos peligrosos.

Los peligros climáticos futuros se estimaron, siempre que fue posible, cuantitativamente, a partir de la incidencia territorial del peligro actual y su evolución predecible, obtenida a partir de las proyecciones ajustadas a los escenarios climáticos antes mencionados (RCP 4.5 y RCP 8.5).

2.1 Evaluación de la susceptibilidad actual y futura

Inestabilidad de la pendiente

La susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos de masa en hebras se evaluó utilizando un método estadístico bivariado basado en Bayesiano, valor informativo (VI), utilizando los siguientes factores condicionantes: pendiente, exposición a taludes, geología, curvatura de las hebras (perfil cruzado), uso y ocupación del suelo, índice de posición topográfica e índice de humedad topográfica. Como variable dependiente, se utilizó un inventario de movimientos masivos en hebras desencadenadas por precipitaciones con 4047 ocurrencias identificadas en 19 municipios de la región de Lisboa y valle del Tajo, incluyendo Setúbal y dos municipios vecinos: Palmela y Sesimbra (Figura 1.). Estos tres municipios (Setúbal, Palmela y Sesimbra) constituyen el territorio de Arrábida, que fue utilizado como referencia para la evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de masas en los hilos de este trabajo.

Los movimientos de masa en hebras se cruzaron con los factores de predisposición de la inestabilidad de hebras, previamente seleccionadas y clasificadas, y se estableció el peso de las clases de cada factor utilizando la primera ecuación del método del Valor Informativo (Yin y Yan, 1988; Zêzere, 2002) (ecuación 1):

$$I_i = \ln \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (1)$$

Dónde:

I_i - Valor informativo de la variable i ;

S_i - número de unidades terrestres (celda con 100 m²) con movimientos de masa en hebras y con la presencia de la variable X_i (clase de factor y);

N_i - número de unidades terrestres con presencia de x_i variable;

S - número total de unidades terrestres con movimientos de masa en hebras;

N - número total de unidades de tierra en el área de estudio.

El VI total de una unidad de tierra j (celda con 100 m²) está determinado por la segunda ecuación del Método del Valor de Información (Zêzere, 2002) (ecuación 2):

$$I_j = \sum_{i=1}^m X_{ji} I_i \quad (2)$$

Dónde:

I_j - Valor total de la información en la unidad de terreno j (celda);

n - número de variables;

X_{ji} - 1 si la clase variable está presente en la unidad de terreno j (celda); 0 si la clase variable no está presente.

Figura 2 representa la curva de predicción del modelo de susceptibilidad, construida a partir del cruce de los resultados de la aplicación de la ecuación (2) territorio no arrávida con las áreas encarnadas por 197 movimientos de masa en laderas que totalizan 768 800 m². Estos movimientos masivos en hebras fueron inventariados en 2012 con interpretación de fotografía aérea y trabajo de campo. Estos son, en esencia, deslizamientos de tierra en la superficie provocados por precipitaciones. No se conoce la fecha de ocurrencia de la mayoría de los movimientos, pero se considera que el tiempo característico de mantenimiento de estas manifestaciones de inestabilidad en el paisaje no es más de 20 años. Por lo tanto, para fines de modelado, se supone que los 197 movimientos de masa en hebras pueden haber ocurrido en un intervalo de tiempo de 20 años, por lo que el área promedio inestabilizada anualmente en el territorio de arrávida fue de 38440 m².

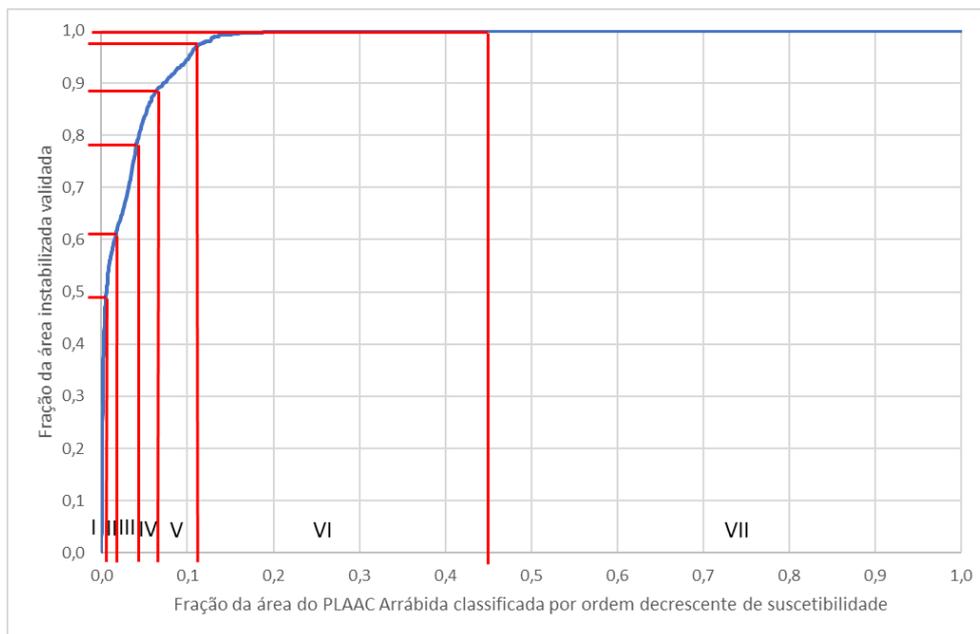


Figura 2. Curva de predicción del modelo de susceptibilidad a movimientos de masas en hebras en el territorio de Arrábida. Las líneas rojas definen las 7 clases de susceptibilidad identificadas.

Figura 2 también representa 7 clases de susceptibilidad definidas por roturas de pendiente en la curva de predicción, donde la Clase I corresponde a la susceptibilidad más alta y la clase VII corresponde a la susceptibilidad más baja. Asumiendo la capacidad predictiva de cada clase de susceptibilidad expresada en la Tabla 4 y considerando el valor medio anual de un área de recuadro de 38.440 m², en los 20 años anteriores a 2012, se estimó la probabilidad actual de ocurrencia de movimientos de masa en hebras, utilizando la ecuación (3), propuesta por Zêzere *et al* (2004).

$$P_{iy} = 1 - \left(1 - \frac{T_{slide}}{T_y}\right) \times predy \quad (3)$$

Dónde:

P_{iy} - probabilidad de ocurrencia de movimiento de masa en hebras en la celda *j* en la clase de susceptibilidad *y*;

T_{slide} - es el área de inestabilidad total esperada en un período determinado;

T_y – es el área total de la clase de susceptibilidad *y*;

Predy – es la capacidad predictiva de la clase de susceptibilidad *y*.

Dado que se desconoce la fecha de ocurrencia de la generalidad de los movimientos de masa en los taludes inventariados en el territorio de Arrábida, no es posible estudiar

los umbrales de precipitación responsables de su desencadenamiento. Sin embargo, esta región está geográficamente cerca de Lisboa y la región al norte de Lisboa, para la cual hay abundante literatura sobre el tema (por ejemplo, Zêzere *et al.*, 2005; Vaz *et al.*, 2018) y que apunta a un umbral de regresión de $R = 5,5D + 124,6$ y un umbral mínimo de $R = 4,4D + 56,5$, donde R es la precipitación crítica que desencadena los movimientos de masa en las hebras y D es el número de días consecutivos (Vaz *et al.*, 2018). Además, los movimientos masivos en las hebras existentes en el territorio de Arrábida se asocian típicamente con episodios de fuertes lluvias que duran unos días (5 a 15 días).

En un estudio reciente, Araújo (2021) diseñó los umbrales de precipitación para la inestabilidad de las laderas en la región norte de Lisboa para finales del siglo XXI, en el contexto del cambio climático y para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, considerando 4 escalas de duración de precipitación acumulada (1 día, 10 días, 30 días y 60 días). En vista de la duración del período crítico de precipitación más característico para el desencadenamiento de movimientos de masa en hebras en el territorio de Arrábida, las proyecciones para la duración de 10 días son de particular interés, para lo cual se espera un aumento en la frecuencia del 5 % a fines del siglo XXI en el caso del escenario RCP 4.5, y una reducción del 10 % en la frecuencia en el caso del escenario de RCP 8.5 (Araújo, 2021).

La estimación de las probabilidades futuras de ocurrencia de movimientos de masa en hebras en el territorio de Arrábida tuvo en cuenta los umbrales de precipitación establecidos para la región de Lisboa por Vaz *et al.* (2018) y las proyecciones de Araújo (2021), que se suponen válidas para el área de estudio. Así, es posible estimar, para el territorio de Arrábida, una superficie media en un año instabilizado en los últimos 30 años del siglo XXI (2070-2100), de 40 362 m² y 34 596 m² (RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente), que se compara con los 38 440 m² anuales estimados para la actualidad.

Inundaciones rápidas

Las crecidas fluviales que se producen en el municipio de Setúbal son el resultado de inundaciones rápidas, que se producen en cuencas hidrográficas pequeñas y medianas.

La evaluación de la susceptibilidad a las inundaciones tuvo en cuenta la documentación disponible de trabajos anteriores, a saber: i) las zonas amenazadas por las inundaciones delimitadas en el Marco Regional de la Reserva Ecológica Nacional de la AML; ii) las zonas de inundación definidas en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), puestos a disposición por la Agencia Portuguesa de Medio Ambiente (EPA); y iii) áreas amenazadas por inundaciones trazadas a nivel municipal, dentro del ámbito de la delimitación de la Reserva Ecológica Nacional.

Adicionalmente, se realizó la identificación de líneas de agua con mayor propensión a la generación de inundaciones utilizando el método descrito en Reis (2011) y Santos *et al.* (2019). De acuerdo con el modelo adoptado, las variables de acondicionamiento descriptivo -área de drenaje acumulado, pendiente y permeabilidad relativa- fueron recolectadas en estructura matricial para todas las cuencas drenantes, incluso cuando se

extienden más allá de los límites del municipio de Setúbal. Luego, mediante Análisis Multicriterio y de acuerdo a un proceso iterativo -que incluyó su validación en el terreno y por evidencia histórica- se midió la ponderación a utilizar en el modelo final de susceptibilidad de cursos de agua por la ocurrencia de inundaciones. Para estos cursos de agua así se identificó, en detalle, la delimitación de las zonas inundadas consideradas como la zona contigua a las orillas de los cursos de agua que se extiende hasta la línea alcanzada por la inundación máxima, interpretada mediante criterios geomorfológicos, apoyados en información topográfica, pedológica e interpretación de fotografía aérea ortorectificada.

La susceptibilidad a inundaciones por inundaciones rápidas se clasificó en 3 clases (altas, moderadas y reducidas) que reflejan no solo la propensión a la ocurrencia de inundaciones, sino también la magnitud esperada en vista de la configuración de las áreas inundadas y su encuadre dentro de las respectivas cuencas hidrográficas.

Las inundaciones rápidas en el área de estudio se asocian con episodios de lluvia muy intensos y concentrados en el tiempo, generalmente en períodos de unas pocas horas. En este contexto, ante la ausencia de datos generalizados de precipitaciones horarias, las precipitaciones diarias fueron consideradas como un indicador de referencia para estimar las probabilidades de ocurrencia de inundaciones rápidas en el futuro, para los dos escenarios climáticos analizados, tomando como referencia la situación actual.

Los datos de localización climática disponibles para este territorio (PMAAC AML, 2018) muestran que habrá un aumento en el número promedio de días con precipitaciones ≥ 20 mm en invierno, más pronunciadas en RCP 4.5, a fines del siglo XXI. Los resultados obtenidos por Araújo (2021) en la proyección de umbrales de precipitación para la inestabilidad de taludes en la región norte de Lisboa para finales del siglo XXI, en el contexto del cambio climático y para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, apuntan en la misma dirección. En este sentido, cabe destacar que los episodios de lluvias muy fuertes que desencadenan movimientos de masa en taludes superficiales también son responsables de la ocurrencia de inundaciones rápidas. La ocurrencia simultánea de los dos tipos de procesos ocurrió en el Área Metropolitana de Lisboa, por ejemplo, en noviembre de 1967 y en noviembre de 1983.

En vista de la corta duración de los episodios de precipitación que desencadenan las inundaciones rápidas, las proyecciones realizadas por Araújo (2021) para precipitaciones extremas que duran 1 día son particularmente importantes, para lo cual se espera un aumento en la frecuencia del 9 % y 6 % a fines del siglo XXI, para RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente.

Asumiendo las proyecciones de Araújo (2021) como válidas para el área del municipio de Setúbal y admitiendo que el área inundada representada en la susceptibilidad actual a inundaciones por inundaciones rápidas corresponde al período de retorno de 1 000 años (probabilidad anual de 1 %), es posible estimar el período de retorno de un área inundada equivalente a fines de siglo para RCP 4.5 (91.7 años) y para RCP 8.5 (94.3 años).

Cabe decir que estas estimaciones están en línea con las proyecciones del Plan de Gestión del Riesgo de Inundación 2022/2027 para RH6 – Sado y Mira (APA, 2020). El análisis realizado en este documento de los posibles impactos del cambio climático en los caudales de la punta de inundación para el período de retorno de 100 años se basó en la información proporcionada en el portal climático (<http://portaldoclima.pt/pt/>) y consideró que habrá un aumento en la frecuencia de eventos extremos, con la ocurrencia de precipitaciones de alta intensidad, concentradas en períodos cortos, se espera un aumento en las intensidades de precipitación asociadas con el período de retorno de 100 años. Además, se estimó la posible variación de los caudales de punta para el período de retorno con probabilidad de ocurrencia promedio ($T = 100$ años). Se consideraron los valores medios mensuales de precipitación para el período 2041-2070 con el fin de considerar escenarios aplicables a un futuro intermedio. Para ambos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, se calcularon las medias de las anomalías de los meses de invierno de diciembre a febrero y se seleccionó la media más alta, que se definió como el porcentaje de aumento a aplicar a los hidrogramas de inundación (APA, 2020). De acuerdo con esta metodología, la variación esperada en los caudales del punto de inundación en la cuenca del Sado es de entre el 3 y el 4 %, lo que es compatible con la reducción estimada en el período de retorno para la inundación centenaria.

Inundaciones en los estuarios

La evaluación de la susceptibilidad a las inundaciones estuarinas tuvo en cuenta la documentación disponible de trabajos anteriores, a saber, la delimitación de la inundación centenaria en el área del estuario del sado, producida por el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil (LNEC).

La delimitación de las áreas sujetas a inundaciones estuarinas a finales del siglo XXI tuvo en cuenta las proyecciones puestas a disposición por la NASA en conjunto con el IPCC (2021), accesibles en [<https://sealevel.nasa.gov/>], que apuntan a aumentos del nivel del mar en la costa portuguesa hasta 2100 de 0,59 m y 0,79 m, respectivamente para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Adicionalmente, se utilizó como referencia la modelización disponible en la *Herramienta de Cribado de Riesgos Costeros de Climate Central* [<https://coastal.climatecentral.org/>] (Kulp y Strauss, 2019), considerando las siguientes condiciones del escenario:

- Fuente de la proyección del aumento del nivel del mar: datos consensuados de "estado del arte" (IPCC, 2021);
- Tipo de proyección: subida del nivel del mar + efecto local de inundación moderada, con 10% de probabilidad anual de superación. Los datos del incremento causado por la inundación se basan en el trabajo de Muis *et al* (2016).
- Año: 2100
- Incertidumbre (favorable; desfavorable): la incertidumbre favorable significa que las emisiones de gases de efecto invernadero tendrán efectos menos graves en el aumento

del nivel del mar en comparación con lo que esperan los científicos; la incertidumbre desfavorable significa lo contrario. En este trabajo se asumió una incertidumbre desfavorable, representada por el percentil 95 de las proyecciones de aumento del nivel del mar.

- Trayectoria de las emisiones:
 - a) recortes moderados (RCP 4.5): las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero alcanzan su punto máximo cerca de 2040 y luego disminuyen, lo que resulta en un aumento de la temperatura de aproximadamente 2,7 °C por encima de los niveles preindustriales para 2100;
 - b) emisiones no controladas (RCP 8.5): Las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero aumentan rápidamente durante la mayor parte del siglo, duplicándose aproximadamente para 2050 y dando lugar a un aumento de la temperatura de aproximadamente 4,4 °C por encima de los niveles preindustriales para 2100.

Inundaciones costeras y rebase del oleaje

La caracterización y delimitación de las zonas costeras sujetas a inundaciones y desbordamientos utiliza como referencia el trabajo promovido por la EPA que apoyó el Programa Litoral de Espichel – Odeceixe.

La evaluación y el mapeo del peligro asociado con las inundaciones costeras y rebase del oleaje fueron llevados a cabo para la APA, por un equipo de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Lisboa, para los horizontes temporales de 2050 y 2100 (Silva *et al.*, 2013a, 2013b). Esta evaluación incluyó los efectos asociados con el cambio climático, en particular con respecto al aumento del nivel del mar. También se consideró el potencial de retroceso "instantáneo" del perfil de una playa (y la costa) cuando se actúa por una tormenta extrema, con diferentes períodos de retorno; y también la evolución futura del litoral asociada a la tendencia a largo plazo, basada en la evolución observada en los últimos 50 años. Así, las zonas de peligro consideradas son pistas que se extienden desde la costa hacia tierra, cuya anchura viene determinada por la suma de los siguientes componentes: evolución de la costa, retroceso por aumento del nivel del mar, retroceso por tormenta e inundación y desbordamiento costero.

Cabe informar que, en las playas limitadas por un acantilado o estructura, independientemente del escenario considerado, la evolución del límite de tierra se consideró nula y los impactos de los procesos no se consideraron en el trabajo original (Silva *et al.*, 2013a, 2013b). En estos casos, se utilizó como referencia una cuota de inundación de 8 metros sobre el nivel del mar, teniendo en cuenta la variación del nivel medio del mar, el preia-mar máximo astronómico, el aumento del nivel del mar de *origen meteorológico (marejada ciclónica)* registrado y el sesgo de las olas, un valor que se acerca a los calculados para la costa del municipio de Sintra por Marques *et al* (2009) y a la costa del municipio de Cascais por Taborda *et al* (2010).

La delimitación de áreas sujetas a inundaciones y galegación costera a finales del siglo XXI también tuvo en cuenta las proyecciones de aumento del nivel del mar publicadas por la NASA en conjunto con el IPCC (2021), así como los modelos disponibles en la Herramienta de *Detección de Riesgos Costeros de Climate Central*, a las que se hace referencia en las inundaciones estuarinas.

Erosión costera y retroceso de acantilados

La caracterización y delimitación de las zonas de inestabilidad y retroceso de acantilados toman como referencia los trabajos promovidos por la APA que apoyó el Programa Litoral de Espichel – Odeceixe.

La evaluación del peligro de las zonas con costa arriba fue realizada para la APA por un equipo de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Lisboa, cuyo trabajo y resultados están sistematizados en Penacho *et al* (2013a, 2013b) y Marques *et al* (2013). La obra se sustentó en un inventario de 1049 movimientos de masas en acantilados, entre Nazaré y Cabo Espichel. Se utilizaron técnicas de fotointerpretación aplicadas a dos series de referencia de fotografías aéreas verticales, incluyendo uno de los vuelos más antiguos existentes que cubren la sección costera en estudio (finales de la década de 1940) y otro en 2010. También se utilizaron series de fotografías aéreas de edad intermedia disponibles para caracterizar la distribución temporal de inestabilidades en acantilados (Penacho *et al.*, 2013a).

En la zona comprendida entre cabo Espichel y Setúbal también se inventariaron 86 movimientos masivos en hilos de los tipos de colapso y deslizamiento, a partir de la interpretación de mapas digitales ortofotográficos y un extenso trabajo de campo.

En el estudio original, se delimitaron los rangos de riesgo adyacentes a la cresta del arriba y los rangos de protección adicionales. Los rangos de riesgo adyacentes a la cresta de los acantilados se definieron teniendo en cuenta, en cada sector de acantilados con un comportamiento razonablemente homogéneo en términos de inestabilidad, el tamaño máximo de los movimientos inventariados en estudios comparativos de fotografías aéreas antiguas (1947 o 1958) con los más recientes disponibles en el momento de la preparación de los estudios para el POC (FLIGHT INAG de 1996), pero también las características geomorfológicas y geológicas de los acantilados que condicionan la ocurrencia de inestabilidades.

La actual zona de susceptibilidad a la erosión costera y a la sangría de acantilados en el municipio de Setúbal corresponde al rango de riesgo adyacente a la cresta de los acantilados, propuesto por Marques *et al.* (2013), tras la evaluación de la idoneidad de esas pistas en el POOC original. Adicionalmente, las áreas de potencial inestabilidad asociadas a los acantilados y señaladas en el nuevo Programa de Borde Costero se integraron en la zona de susceptibilidad actual. Con el aumento del nivel del mar proyectado para finales del siglo XXI (0,59 m y 0,79 m, respectivamente para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5) se espera la erosión costera y la disminución más pronunciada de los acantilados en el área de estudio. En este contexto, el rango de

protección adicional a la cresta del acantilado, previsto en el POOC, se agrega a la zona de susceptibilidad actual para establecer la zona de susceptibilidad proyectada para fines del siglo XXI. Los datos disponibles no permiten una diferenciación sostenida de la erosión costera y el retroceso de los acantilados asociados al aumento del nivel del mar correspondiente a los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, por lo que la cartografía presentada para la susceptibilidad futura a la erosión costera y retroceso de acantilados en el municipio de Setúbal es válida para los dos escenarios climáticos considerados.

2.2 Evaluación de la exposición

Se realizó la evaluación de la exposición a riesgos considerados en el municipio de Setúbal para los siguientes elementos expuestos: vías viales, vías férreas, edificios residenciales, población residente y equipos estratégicos, vitales y/o sensibles.

Las carreteras se obtuvieron *del Open Street Map* y se reclasificaron en 4 clases: autopistas y vías rápidas; red de carreteras primarias; red de carreteras secundarias; y red de carreteras terciarias. En total hay 228 km de vías en el área de estudio, con la distribución por tipo de vías que se sistematiza en Tabla 1.

Tabla 1. Tipología de caminos y su extensión en el municipio de Setúbal.

Tipo de vía	km	%
Autopistas y vías rápidas	16,5	7,2
Red de carreteras primarias	108,8	47,7
Red de carreteras secundarias	32,1	14,1
Red de carreteras terciarias	70,7	31,0
Total	228,1	100,0

La red ferroviaria tiene una longitud de 32,6 km e incluye dos tramos de la línea Sur, así como un conjunto de pequeñas extensiones, concretamente en la Zona de playas de Sado.

Los edificios, representados geoméricamente por su centroide, se obtuvieron de la Base de Georreferenciación de Edificios (BGE) del Instituto Nacional de Estadística (INE), y se tipifican siempre que la función residencial existe en el edificio. La población que vive por edificio fue estimada por un cruce dasimétrico entre BGE y BGRI del Censo de 2011 (García *et al.*, 2016).

BGE marca 24320 edificios residenciales en el municipio de Setúbal. La población total residente superó las 121.000 personas, según el Censo de 2011¹.

¹Según los resultados provisionales del Censo 2021, la población que vive en el municipio de Setúbal aumentó a 123.519 individuos, pero los datos aún no están disponibles para BGRI.

La distribución de equipos estratégicos, vitales y/o sensibles fue proporcionada por el Ayuntamiento de Setúbal. Estos equipos se clasificaron en siete categorías, dependiendo de los servicios a los que están asociados: administración, protección civil y seguridad, salud, educación, servicio social, cultura y turismo.

En la Tabla Tabla 2 se sistematizan los equipos estratégicos, vitales y/o sensibles existentes en el municipio de Setúbal.

Tabla 2. Equipamiento estratégico, vital y sensible del municipio de Setúbal.

Equipamientos estratégicos, vitales y/o sensibles	Número
Equipamientos de administración	43
Equipamientos de protección civil y seguridad	14
Equipamientos de salud	44
Equipamientos educativos	89
Equipamientos sociales	50
Equipamientos culturales	49
Equipamientos turísticos	23
Total	312

La evaluación de la exposición actual se llevó a cabo mediante la intersección de los elementos antes mencionados (carreteras, edificios residenciales, población residente y equipos estratégicos, vitales y / o sensibles) con áreas peligrosas correspondientes a inestabilidad de desprendimientos, inundaciones por inundaciones rápidas, inundaciones estuarinas, inundaciones costeras y rebase del oleaje, y erosión costera y retroceso de acantilados.

La evaluación de la exposición a finales del siglo XXI es un ejercicio difícil, principalmente debido a la enorme incertidumbre sobre la cantidad de la población y su distribución. En este contexto, optamos por cruzar los elementos expuestos presentes (carreteras, edificios residenciales, población residente y equipos estratégicos, vitales y/o sensibles) con áreas identificadas como peligrosas a finales del siglo XXI, tanto en escenarios de RCP 4.5 como de RCP 8.5. Los resultados obtenidos con este enfoque reflejan la exposición que tendrían los elementos actualmente existentes en la zona estudiada, si existieran hoy los escenarios climáticos proyectados para 2100, con las consecuencias resultantes de los peligrosos procesos con estresor climático.

2.3 Evaluación de vulnerabilidades

En el proceso de análisis de riesgos actual y futuro en escenarios de cambio climático, elegimos considerar solo el componente de criticidad de la vulnerabilidad social. La criticidad se define por el conjunto de características y comportamientos de los individuos que condicionan su propensión a sufrir daños durante y después de la ocurrencia de un evento desastroso. Tales características pueden contribuir a la ruptura del sistema y de los recursos de las comunidades que les permitan responder o hacer frente a escenarios catastróficos. Dependiendo de la mayor o menor disponibilidad de información, las

variables a incluir en la evaluación de criticidad deben representar las siguientes áreas: demografía, apoyo social, condición del patrimonio construido, economía, educación, vivienda, estructura familiar, empleo y salud.

La evaluación de criticidad en el municipio de Setúbal forma parte de un estudio a nivel de la Área Metropolitana de Lisboa (AML), que confiere mayor robustez y confianza en los resultados, por lo que permite el encuadre y comparabilidad de los índices obtenidos con el área circundante, que incluye tanto territorios fuertemente urbanizados como territorios de alta ruralidad. La sección estadística fue adoptada como unidad territorial de análisis, tal como se define en la Base Geográfica de Referencia de Información (BGRI) del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2011). En el municipio de Setúbal, la población promedio es de 631 personas y la superficie promedio es de 0,94 km² por sección estadística.

A partir de los datos del Censo de 2011 para el nivel de desagregación de la sección estadística, se logró definir un conjunto inicial de 45 variables, a las que se les eliminó la densidad de población y la densidad de los edificios ya que reflejan exposición y no vulnerabilidad, reteniendo un total de 43 variables (Tabla 3). Para asegurar la comparación entre unidades territoriales de análisis, la mayoría de los datos variables se expresan como proporción.

Tabla 3. Lista de variables consideradas inicialmente para la evaluación de la criticidad en el Área Metropolitana de Lisboa, a la que pertenece el municipio de Setúbal

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 municipio de residencia (%)

Código	Denominación de la variable
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_nao_ler	Proporción de individuos residentes sin saber ler nem escrever (%)
In_emp_1ar	Proporción de población empleada en el sector primario (%)
In_emp_2ar	Proporción de población empleada no sector secundario (%)
In_emp_3ar	Proporción de población empleada no sector terciario (%)
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_emrega	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 (%)
Fa_s_desem	Proporción de famílias clássicas sem desempregados (%)
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	Indivíduos por alojamento familiar clássico de residencia habitual (N.º)
Rel_Mascul	Relación de masculinidade
PensReform	Proporción de individuos residentes pensionistas ou reformados (%)
Pop_femi	Proporción de población femenina no total de población residente (%)

El procedimiento metodológico utiliza la herramienta de Análisis de Componentes Principales (ACP) e incluye 8 pasos secuenciales:

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, con el fin de excluir del universo bajo análisis las variables que presentan multicolinealidad. Entre los pares de variables que presentan valores de correlación superiores a 0,7, se eligió una u otra variable, según los criterios de mayor relevancia y claridad de significado, en términos de interpretación de su papel en la criticidad;

3. Ejecución iterativa de ACP *con rotación varimax* con valores normalizados y medición de la adecuación de los datos mediante el análisis de los parámetros tasa de varianza (debe ser superior al 60 %) y medida de adecuación de la muestra de Kaiser-

Meyer-Olkin (KMO) (debe ser mayor que 0,6), excluyendo las variables que reducen la robustez del conjunto de datos;

4. Aplicación final de los países ACP;

5. Extracción del número de componentes que representan la criticidad. Los componentes principales seleccionados son aquellos que tienen un total de *Eigenvalues iniciales iguales* o superiores a 1;

6. Interpretación de la cardinalidad, o "signo", de cada componente. A partir de la matriz de componentes redondos, se identifican las variables que tienen una *carga superior al* módulo de 0,5. Estas variables se interpretan como una verificación de si la cardinalidad resultante de la ACP está contribuyendo a aumentar o disminuir la criticidad. Se asigna un signo positivo cuando el componente en cuestión aumenta la criticidad y se asigna 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 mediante una suma algebraica simple *de la puntuación extraída* en cada componente principal, según la cardinalidad asignada, y con la asignación de pesos, según el porcentaje de varianza explicada de cada componente;

8. Aplicación de una transformación lineal por el método mínimo-máximo a las puntuaciones de criticidad, de forma que el rango de valores esté entre 0 y 1. Como la evaluación de criticidad se aplicó inicialmente a todas las secciones estadísticas de la AML, el puntaje de criticidad *más alto* obtenido en el municipio de Setúbal fue de 0,880. Por lo tanto, se realizó una nueva transformación lineal por el método mínimo-máximo, donde el valor de 0.880 ahora corresponde a 1.

2.4 Análisis del riesgo

El análisis de riesgos realizado se basa en un índice de riesgo multirriesgo que combina los tres componentes principales del riesgo: susceptibilidad, exposición y vulnerabilidad. El Índice de Riesgo Multi-peligro (IRM) es dimensional y resulta del producto de la susceptibilidad (S), Exposición (E) y Vulnerabilidad (V), utilizando la ecuación (4):

$$IRM = S^{\frac{1}{3}} \times E^{\frac{1}{3}} \times V^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

El IRM, considerando las diferencias apropiadas en relación con la escala, los componentes de riesgo y los datos de entrada, se basa en el índice de riesgo INFORM de referencia internacional, que combina datos de 16 componentes que describen peligros, exposición, vulnerabilidad y falta de capacidad de apoyo (De Groeve *et al.*, 2014). La formulación adoptada en este trabajo se aplicó recientemente con éxito a escala municipal en Portugal, para el riesgo de inundación (Santos *et al.*, 2020) y los movimientos de masas en hebras (Pereira *et al.*, 2020).

El análisis de riesgos, con el cálculo del IRM, se realizó para el presente y para el clima de finales del siglo XXI, considerando los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. La sección estadística (UT) de análisis fue adoptada como la unidad territorial (UT), tal como se define en la Base Geográfica de Referencia de Información (BGRI) del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2011).

La susceptibilidad a múltiples peligros se calculó utilizando la intersección de UT con áreas susceptibles de verse afectadas por cada uno de los procesos que responden al factor de estrés climático: inestabilidad de la pendiente; inundaciones rápidas; inundaciones de estuarios; inundaciones costeras y rebase del oleaje; y erosión costera y retroceso de acantilados. El ejercicio se llevó a cabo para tres escenarios, correspondientes a la situación actual (escenario 1) y el clima de finales del siglo XXI, para RCP 4.5 (escenario 2) y RCP 8.5 (escenario 3).

Para cada UT y para cada escenario, la susceptibilidad a múltiples riesgos se calculó por la suma del porcentaje de área afectada por cada uno de los procesos considerados, según la ecuación (5):

$$SUTi = \sum_{i=1}^n Zi PCi \quad (5)$$

donde: Zi es la fracción (%) de la Unidad Territorial i interconectada por cada peligro; PCi es el peligro climático i (inestabilidad de la pendiente; inundaciones por inundaciones rápidas; inundaciones de estuarios; inundaciones costeras y rebajes del oleaje; erosión costera y retroceso de acantilados).

Dado que los procesos involucrados en el retroceso de los acantilados y la inestabilidad de las hebras son los mismos, los valores correspondientes de la ecuación (5) se contaron solo una vez en los casos en que hay superposición espacial de estos dos peligros.

La exposición multi-peligro se calculó a partir de la intersección de THE con los edificios expuestos a cada uno de los peligros considerados: inestabilidad de la pendiente; inundaciones por inundaciones rápidas; inundaciones de estuarios; inundaciones costeras y rebases del oleaje; y erosión costera y retroceso de acantilados. La población que vive en estos edificios fue estimada por cartografía dasimétrica a partir de los datos de los Censos de 2011. En el caso de la susceptibilidad, el ejercicio se realizó para tres escenarios, correspondientes a la situación actual (escenario 1) y al clima de finales del siglo XXI, para RCP 4.5 (escenario 2) y RCP 8.5 (escenario 3).

Para cada UT y para cada escenario, la exposición multi-peligro se calculó por la suma de la población residente expuesta a cada uno de los procesos considerados, según la ecuación (6):

$$EUTi = \sum_{i=1}^n Ri PCi \quad (6)$$

onde: Ri es el número de residentes en edificios de la *Unidad Territorial i* interseados por cada peligro.

La vulnerabilidad considerada en el ecuador (4) corresponde a la riticidad y se calculó para cada UT, independientemente de la susceptibilidad y la exposición, como se describe en la sección 2.3.

Al final, antes de la integración en el índice de riesgo multirriesgo, los tres componentes de la RM (susceptibilidad, exposición y vulnerabilidad) se escalaron al intervalo [0, 1], utilizando el método min-max (ecuación 7):

$$X_{i,norm}^m = \frac{X_i^m - X_{i,min}}{X_{i,max} - X_{i,min}} \quad (7)$$

Donde: X_i^m es el valor del componente i del IRM en la Unidad territorial m ; $X_{i,min}$ es el valor mínimo del componente i de IRM; $X_{i,max}$ es el valor máximo del componente i de IRM; y $X_{i,norm}^m$ es el valor normalizado del componente i del IRM en la unidad territorial m .

Los $X_{i,max}$ valores y se determinaron $X_{i,min}$ para cada componente de la RM teniendo en cuenta el rango completo de valores obtenidos para los tres escenarios considerados.

Finalmente, dado que el proceso de integración es multiplicativo, el IRM es igual a cero siempre que cualquiera de los tres componentes que lo definen (susceptibilidad, exposición, vulnerabilidad) sea igual a cero.

3. RESULTADOS

3.1 Susceptibilidad actual y futura

Inestabilidad de la pendiente

La Tabla 4 presenta las probabilidades de ocurrencia de movimientos de masa en hebras, presentes y futuras, asociadas a siete clases de susceptibilidad definidas en el territorio de Arrábida. La Figura 3 muestra la espacialización de estas clases de susceptibilidad en el municipio de Setúbal.

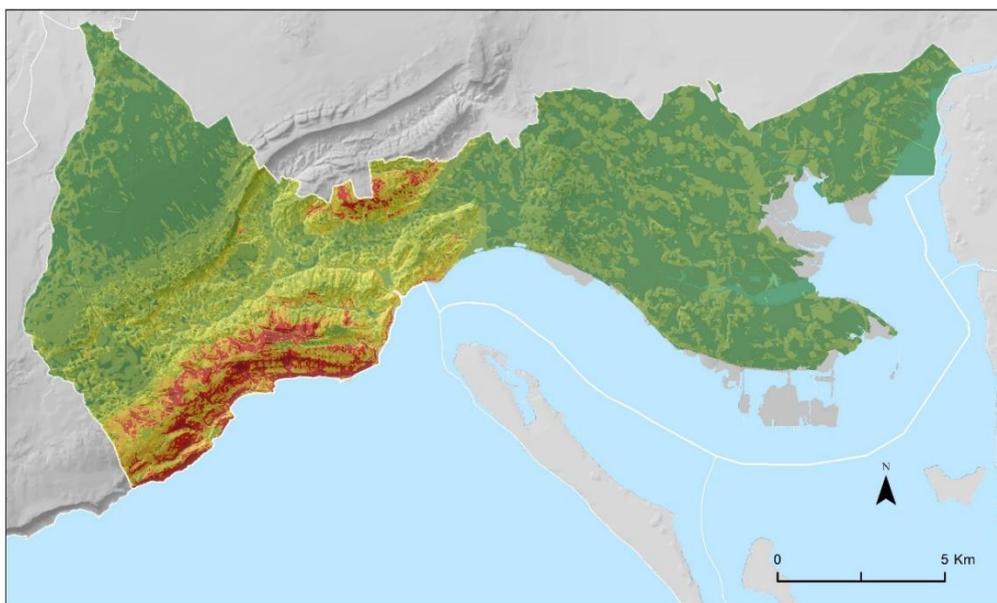
Las probabilidades presentadas en la tabla se calcularon para cada celda de 100 m² que integra cada una de las clases de susceptibilidad y son válidas para períodos de 30 años, actualmente (2022-2052) y en el futuro (2071-2100).

Este trabajo presenta solo un mapa de susceptibilidad, válido para el presente y para el futuro, ya que no se esperan cambios en la incidencia territorial de inestabilidad del talud, que viene determinado por factores de predisposición que son, a esta escala temporal, estáticos (por ejemplo, litología del terreno, pendiente, exposición y curvatura de las hebras). Sin embargo, las probabilidades de ocurrencia asociadas a cada clase de susceptibilidad varían al final del siglo, dependiendo del escenario climático considerado. Tomando como referencia la clase de susceptibilidad más alta (clase I), se verifica que existe una probabilidad actual del 12,2 % de que cualquier célula de 100 m² se vea afectada por un movimiento de masa de hebra en un intervalo de tiempo de referencia de 30 años. La probabilidad de inestabilidad en la misma célula aumentará al

12,81% en el escenario RCP 4.5 a finales de siglo para el mismo período de referencia (30 años, es decir, 2071-2100). Por el contrario, la probabilidad de un movimiento de masa en la misma célula disminuirá al 10,98 % a finales de siglo si se materializa el escenario RCP 8.5.

Tabla 4. Probabilidad de ocurrencia de movimientos de masa en hebras (por celda de 100 m² en 30 años)

Clase de susceptibilidad	Área (ha)	Capacidad predictiva	Probabilidad de inestabilidad (%) por celda de 100 m ² , en 30 años		
			Actual	2100 (RCP 4.5)	2100 (RCP 8.5)
I	461,2	0,4880	12,20	12,81	10,98
II	971,7	0,1168	1,39	1,46	1,25
III	2109,1	0,1651	0,90	0,95	0,81
IV	1498,3	0,0933	0,72	0,75	0,65
V	5152,3	0,1112	0,25	0,26	0,22
VI	29205,7	0,0252	0,01	0,01	0,01
VII	49574,1	0,0004	0,00	0,00	0,00



Clases de susceptibilidade	Probabilidade de inestabilidade em 30 anos (%)		
	Atual	Futuro (RCP 4.5)	Futuro (RCP 8.5)
I (máxima)	12,20	12,81	10,98
II	1,39	1,46	1,25
III	0,90	0,95	0,81
IV	0,72	0,75	0,65
V	0,25	0,26	0,22
VI	0,01	0,01	0,01
VII (mínima)	0,00	0,00	0,00

Figura 3. Susceptibilidad actual y futura a la inestabilidad de taludes en el municipio de Setúbal.

Tabla 5 La Tabla 5 resume la extensión de las cuatro clases de mayor susceptibilidad a la inestabilidad del talud (clases I, II, III y IV) expresadas como porcentaje de la superficie de las parroquias del municipio de Setúbal. Las zonas sujetas a mayor peligro de inestabilidad de taludes ocupan el 15,6 % del municipio de Setúbal, concentrándose en las parroquias de la parte occidental del municipio (Figura 3). Las zonas más peligrosas ocupan el 35,2 % de la parroquia de São Julião, N.S. Anunciada y Sta. Maria da Graça y el 21,9 % de la parroquia de Azeitão (São Lourenço y São Simão). En las demás parroquias del municipio de Setúbal el peligro actual de inestabilidad del desprendimiento es residual o inexistente (Tabla 5).

Tabla 5. Zonas susceptibles de inestabilidad de taludes (clases I, II, III y IV), expresadas en % de la superficie de las parroquias del municipio de Setúbal

Freguesia	%
Gâmbia-Pontes-Alto da Guerra	0,00
Sado	0,00
Setúbal (São Sebastião)	0,04
Azeitão (São Lourenço e São Simão)	21,86
São Julião, N. S. Anunciada e Sta. Maria da Graça	35,23
Total del município	15,62

Inundaciones rápidas

El municipio de Setúbal está sujeto al peligro de inundaciones rápidas, especialmente la cuenca del río Ribeira do Livramento, a pesar del efecto mitigador de las obras de retención de flujo y amortiguación, al menos para eventos no extremos.

Al igual que con el procedimiento adoptado para la inestabilidad de taludes, en el municipio de Setúbal se presenta un único mapa de susceptibilidad a las crecidas fluviales por inundaciones rápidas, ya que no se esperan cambios significativos en las zonas inundadas, con la posible excepción de las resultantes de intervenciones antrópicas a nivel de cuencas hidrográficas y/o cauces fluviales. Sin embargo, al igual que en la inestabilidad de la cadena, los efectos del cambio climático se introducen en el componente temporal del peligroso proceso. Por lo tanto, suponiendo que las áreas inundadas representadas en la Figura 4Figura 5una inundación rápida con un período de retorno de 100 años, se estima que el período de retorno de una inundación equivalente al final del siglo XXI será de 91,7 años en el caso del escenario RCP 4.5 y de 94,3 años en el caso del escenario RCP 8.5. Por lo tanto, estos resultados muestran que, para ambos escenarios, la probabilidad de inundaciones rápidas para fines del siglo XXI aumenta en el municipio de Setúbal.

Las áreas susceptibles a inundaciones rápidas ocupan alrededor de 8,6 km² en el municipio de Setúbal (alrededor del 3,7 % del área total), y se encuentran principalmente en las parroquias de Gambia-Pontes-Alto da Guerra, São Julião, N. S. Anunciada y Sta. Maria da Graça y Azeitão (San Lorenzo y San Simón) (Figura 4, Tabla 6). Sin embargo,

existen fuertes contrastes con respecto a la distribución de las clases de susceptibilidad. De hecho, la clase de alta susceptibilidad es espacialmente más relevante en las parroquias de São Julião, N. S. Anunciada y Sta. Maria da Graça y Gambia-Pontes-Alto da Guerra, donde representa el 57,7 % y el 49,4 % de sus zonas inundadas por inundaciones rápidas. En oposición, esta clase de susceptibilidad es mucho menos relevante en la parroquia de Azeitão (São Lourenço y S. Simão), donde representa solo el 7,9 % del área inundada por inundaciones rápidas. Las parroquias de Sado y Setúbal (São Sebastião), además de tener un área inundada por inundaciones rápidas reducidas, registran solo la clase de susceptibilidad reducida.

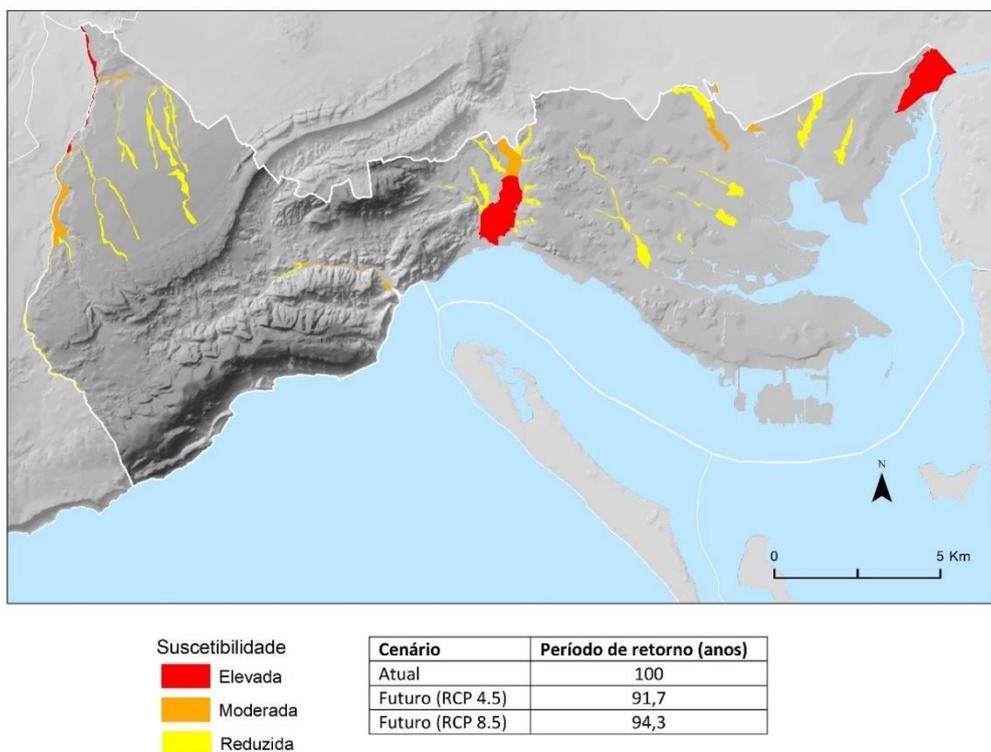


Figura 4. Susceptibilidad actual y futura a inundaciones por inundaciones rápidas en el municipio de Setúbal.

Tabla 6. Zonas susceptibles de inundación por inundaciones rápidas en las parroquias del municipio de Setúbal

Freguesia	Área susceptible (km ²)	Clases de susceptibilidad (%)		
		Elevada	Moderada	Reducida
Gâmbia-Pontes-Alto da Guerra	2,9	49,4	9,3	41,3
Sado	0,2	0,0	0,0	100,0
Setúbal (São Sebastião)	0,6	0,0	0,0	100,0
Azeitão (São Lourenço e São Simão)	2,2	7,9	24,1	68,0
São Julião, N. S. Anunciada e Sta. Maria da Graça	2,6	57,7	19,2	23,1
Total del município	8,6	36,6	15,3	48,2

Inundaciones en los estuarios

El municipio de Setúbal está sometido al peligro de inundación estuarina, que abarca el cauce del río Sado en la zona del estuario, las extensas zonas sapales que lo enmarcan y algunas zonas de cuota reducida que suelen acompañar la desembocadura de los cursos de agua tributarios de la margen derecha del río Sado. Figura 5 La Figura 5 representa Figura 6 y Figura 7 las áreas inundadas proyectadas para los alrededores del estuario del río Sado a fines del siglo XXI, respectivamente para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

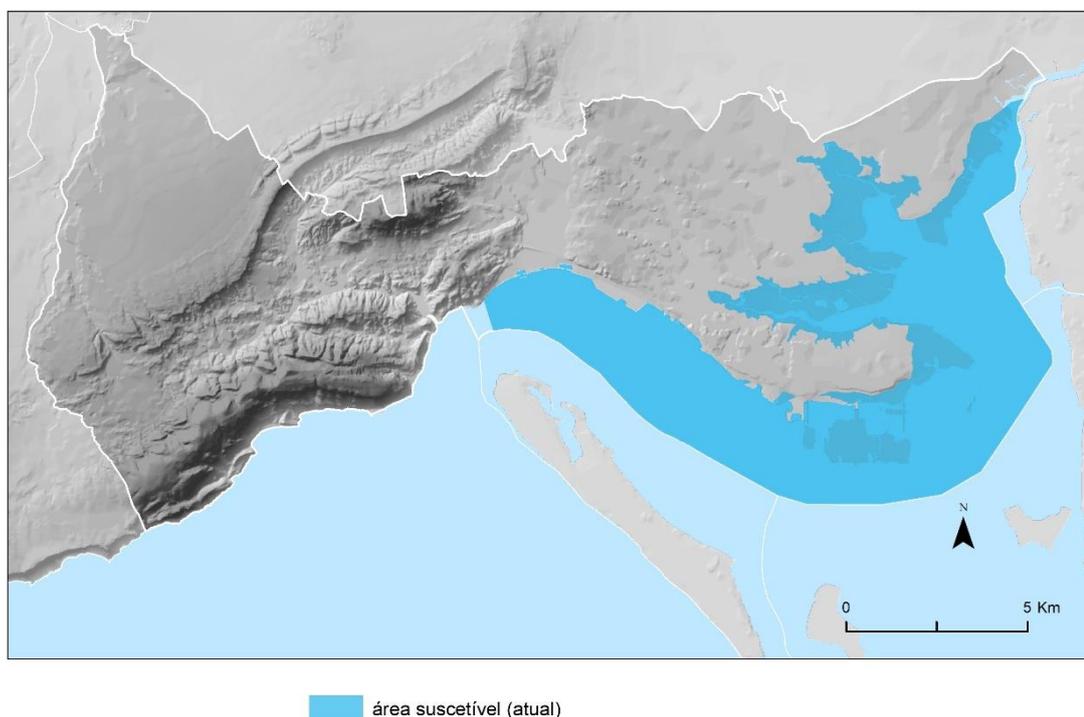
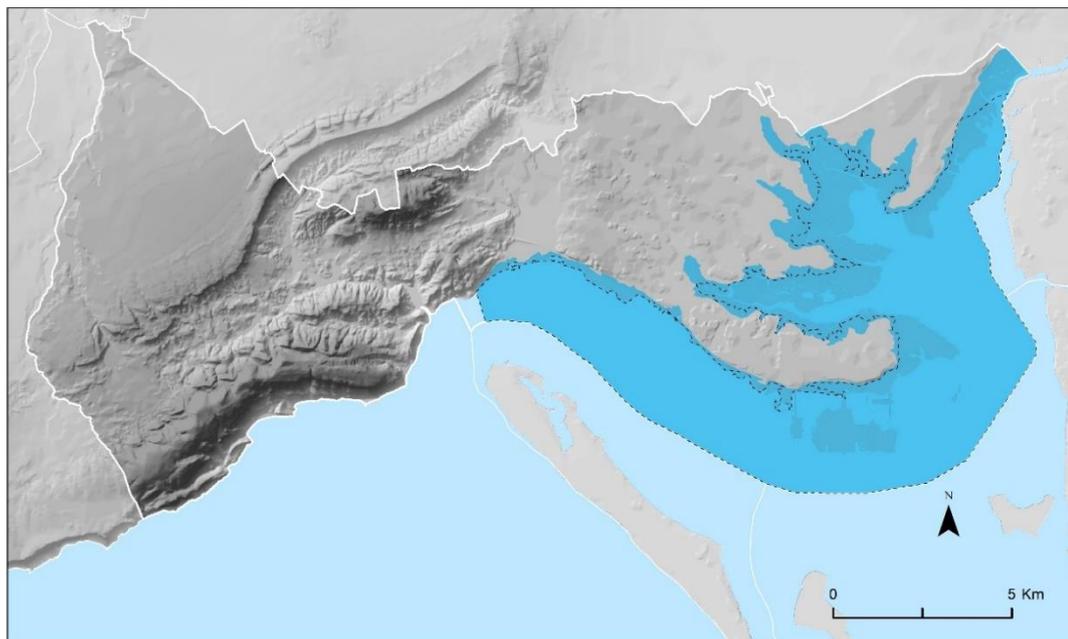


Figura 5. Susceptibilidad actual a inundaciones estuarinas en el municipio de Setúbal.

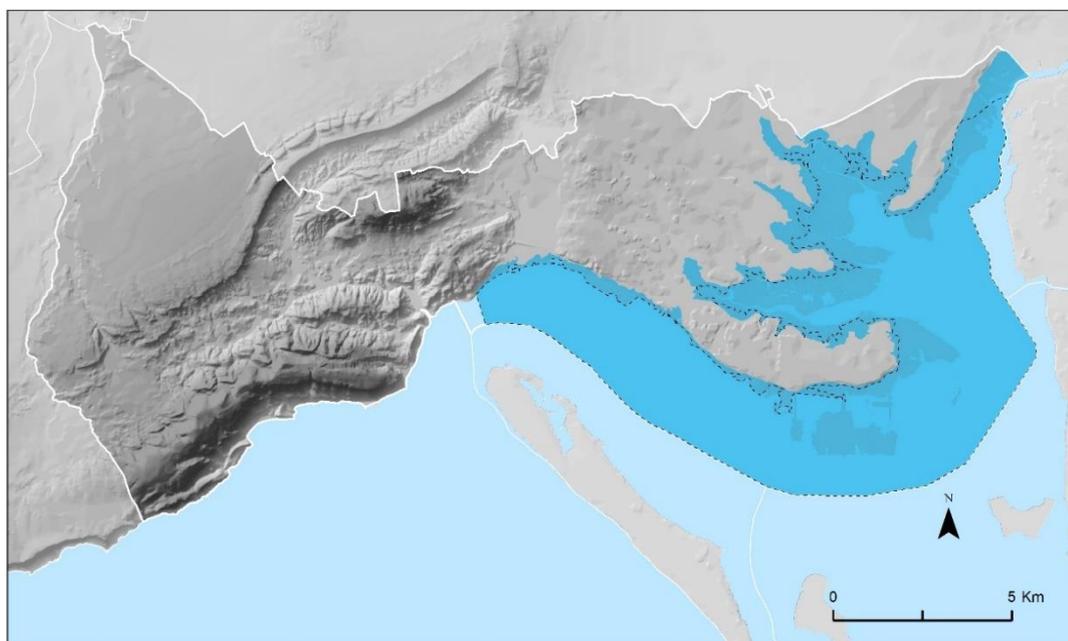
Cabe destacar que las zonas marcadas no representan situaciones de inmersión permanente, sino las zonas afectadas temporalmente por las aguas de la ría como consecuencia de la subida estimada al nivel del mar, sumado al efecto local de una inundación moderada, con probabilidad anual de superación.

En la tabla Tabla 7 se resume la extensión de las zonas susceptibles a inundaciones estuarinas, actualmente y en el futuro, en el municipio de Setúbal. Sin contar las aproximadamente 5665,5 ha que corresponden al cauce del río Sado en su estuario, la superficie actualmente susceptible a inundaciones estuarinas es de unas 1370 ha, concentradas principalmente en las parroquias de Sado y Gambia-Pontes-Alto da Guerra (728 ha y 641 ha, respectivamente).



--- área susceptible (atual)
■ área susceptible (futuro, RCP 4.5)

Figura 6. Susceptibilidad futura (2100) a inundaciones estuarinas en el municipio de Setúbal (Escenario RCP 4.5).



--- área susceptible (atual)
■ área susceptible (futuro, RCP 8.5)

Figura 7. Susceptibilidad futura (2100) a inundaciones estuarinas en el municipio de Setúbal (Escenario RCP 8.5).

El área de inundación estuarina proyectada para finales del siglo XXI aumenta en aproximadamente un 70% en comparación con la actual y no varía muy significativamente dependiendo del escenario climático (2309 ha en RCP 4.5 y 2362 ha en RCP 8.5). Los mayores aumentos en las áreas inundadas ocurren en el interior del estuario, en las parroquias de Gambia-Pontes-Alto da Guerra y Sado, pero también son significativos en las parroquias de Setúbal (São Sebastião) y São Julião, N. S. Anunciada y Sta. Maria da Graça, particularmente porque afectarán áreas densamente ocupadas en el frente ribereño de la ciudad de Setúbal.

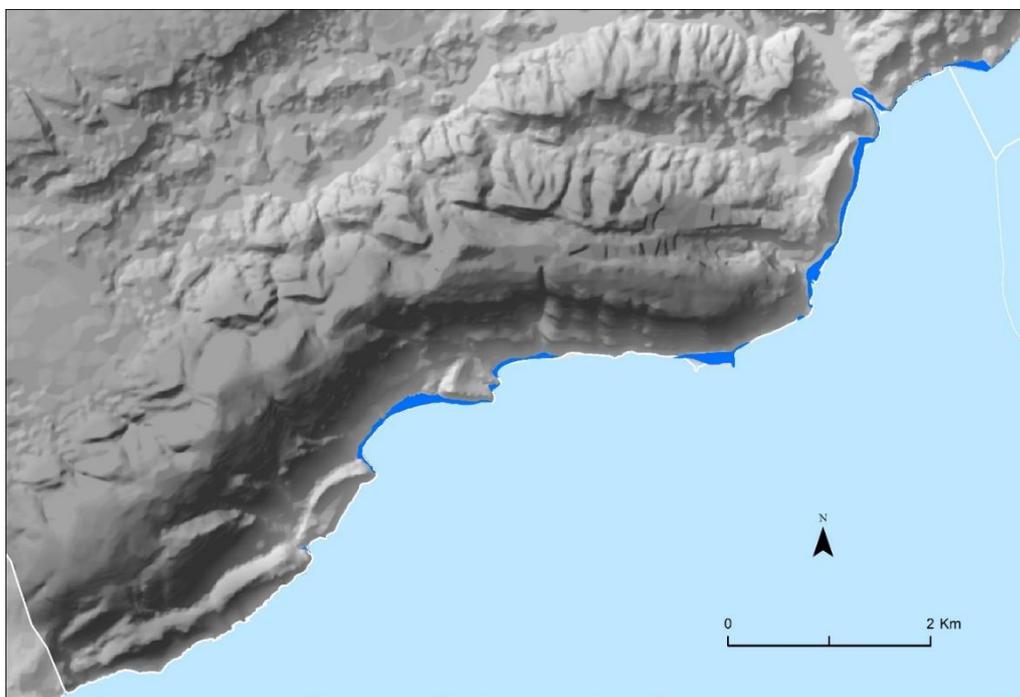
Tabla 7. Zonas susceptibles de inundación estuarina (en ha) en las parroquias del municipio de Setúbal

Freguesia	Actual	Futuro (RCP 4.5)	Futuro (RCP 8.5)
Gâmbia-Pontes-Alto da Guerra	640,77	1106,72	1121,18
Sado	728,25	1051,56	1082,53
Setúbal (São Sebastião)	0,36	116,79	122,26
Azeitão (São Lourenço e São Simão)	0,00	0,00	0,00
São Julião, N. S. Anunciada e Sta. Maria da Graça	0,42	34,15	36,12
Total del municipio	1369,8	2309,22	2362,09

Inundaciones costeras y rebases del oleaje

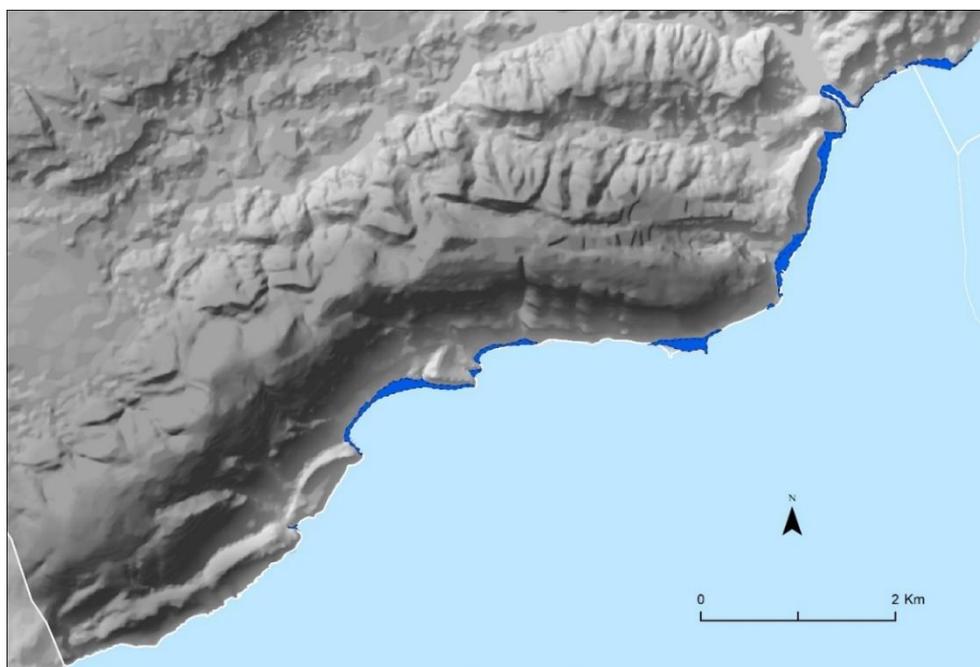
Las inundaciones costeras y rebases del oleaje afectan actualmente solo a una estrecha franja del municipio de Setúbal (33,4 ha), ubicado en los sectores de playa de Serra da Arrábida, en la parroquia de São Julião, N. S. Anunciada y Sta. Maria da Graça y en la parroquia de Azeitão (São Lourenço y São Simão) (Figura 8). La Figura 9 y la Figura 10 las proyecciones de las áreas afectadas por inundaciones costeras y rebase del oleaje al final del siglo XXI, respectivamente para RCP 4.5 y RCP 8.5. La superficie susceptible a inundaciones costeras y rebase del oleaje proyectada para 2100 aumenta en torno a un 30 % respecto a la actual y no varía de forma muy significativa en función del escenario climático (42,5 ha en RCP 4.5 y 43,1 ha en RCP 8.5). La menor expresión del futuro aumento de zonas susceptibles a inundaciones costeras y rebases del oleaje, en comparación con la observada para las inundaciones estuarinas, se explica por la naturaleza confinada y encerrada de las playas del municipio de Setúbal, siempre rodeadas de acantilados rocosos. Sin embargo, las proyecciones realizadas muestran que toda la longitud de las playas del municipio de Setúbal será susceptible a la ocurrencia de inundaciones y / o desbordamiento costero a fines del siglo XXI.

Sin embargo, cabe señalar que, como en el caso mencionado para las inundaciones estuarinas, las zonas marcadas como susceptibles de inundación costeras y rebase del oleaje no representan situaciones de inmersión permanente, sino zonas afectadas temporalmente por las aguas del mar, como resultado del efecto combinado del aumento del nivel del mar, la temperatura máxima astronómica del mar, el *aumento del nivel de las tormentas y las olas*.



■ área susceptible (actual)

Figura 8. Susceptibilidad actual a inundaciones costeras y rebases del oleaje en el municipio de Setúbal.



■ área susceptible (actual)
■ área susceptible (futuro, RCP 4.5)

Figura 9. Susceptibilidad futura (2100) a inundaciones costeras y rebases del oleaje en el municipio de Setúbal (Escenario RCP 4.5).

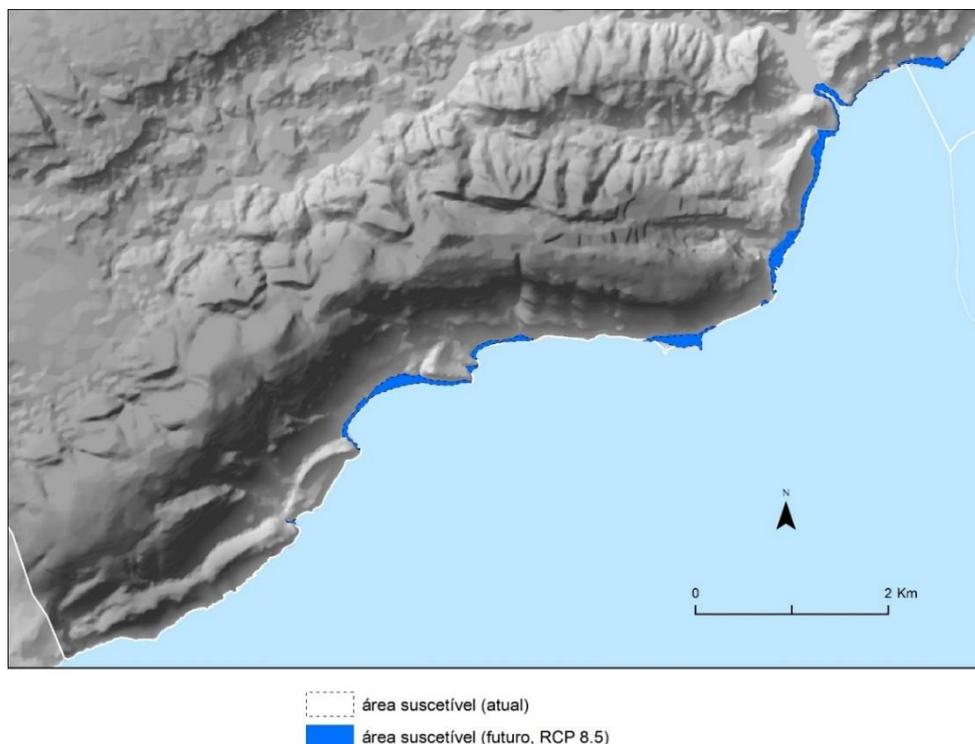
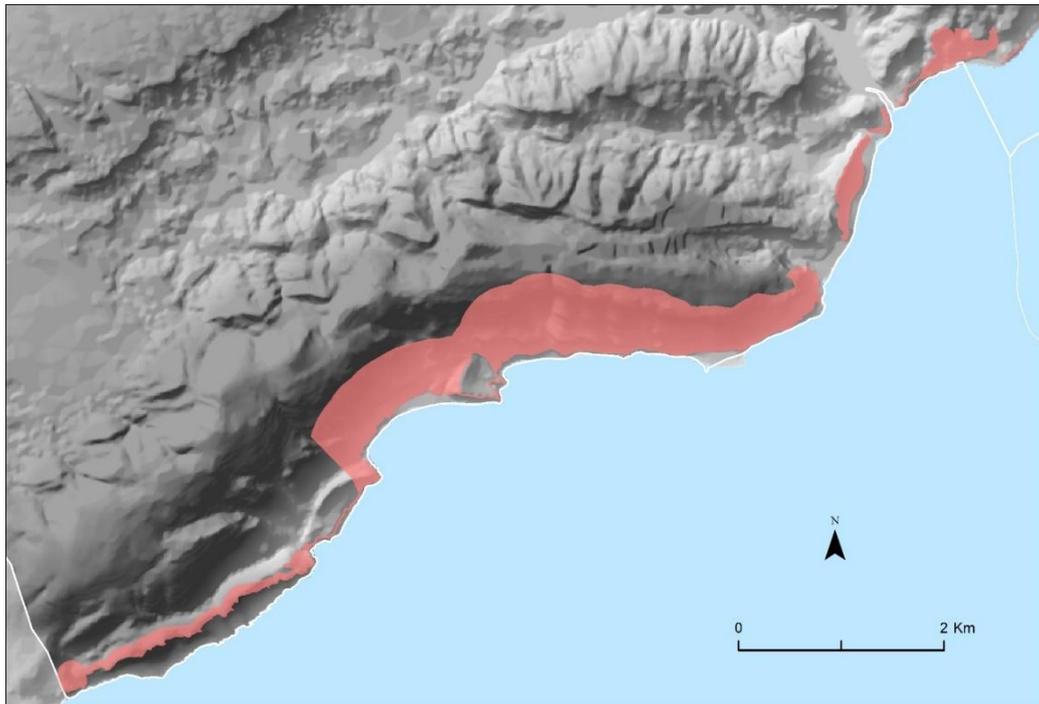


Figura 10. Susceptibilidad futura (2100) a inundaciones costeras y rebase del oleaje en el municipio de Setúbal (Escenario RCP 8.5).

Erosión costera y retroceso de acantilados

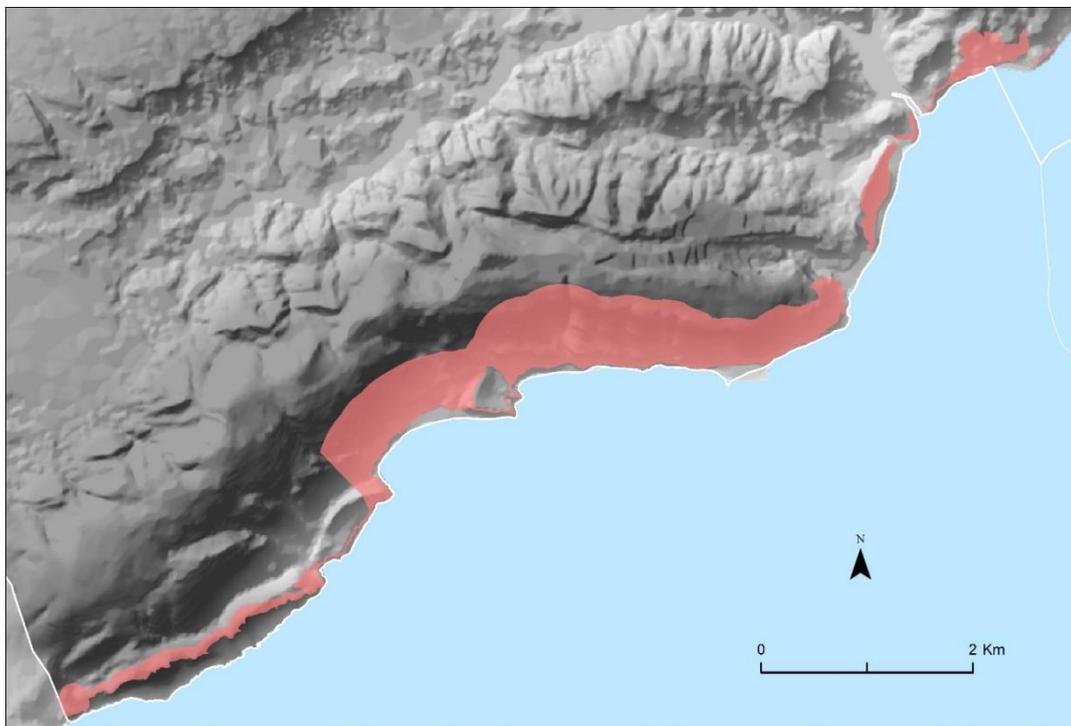
La erosión costera y el retroceso de los acantilados afectan actualmente a una estrecha franja del municipio de Setúbal (378,2 ha, correspondiente al 1,6% de la superficie total del municipio), ubicada en los sectores costeros de arriba en la Serra da Arrábida, en la parroquia de São Julião, N. S. Anunciada y Sta. Maria da Graça y en la parroquia de Azeitão (São Lourenço y São Simão) (Figura 11).

La Figura Figura 12 la proyección de áreas susceptibles a la erosión costera y el retroceso de los acantilados a finales del siglo XXI. Como se mencionó en la sección de metodología, los datos disponibles no permiten una diferenciación sostenida de la erosión costera y el respaldo de los acantilados asociados con el aumento del nivel del mar correspondientes a los escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, estimados en 0,59 m y 0,79 m, respectivamente. Así, la proyección presentada en la Figura Figura 12 se considera válida para los dos escenarios climáticos utilizados.



área susceptible (atual)

Figura 11. Susceptibilidad actual a la erosión costera y retroceso de acantilados en el municipio de Setúbal.



área susceptible (atual)

Figura 12. Susceptibilidad futura (2100) a la erosión costera y al retroceso de acantilados en el municipio de Setúbal (RCP 4.5 y RCP 8.5).

El área proyectada como susceptible a la erosión costera y al retroceso de acantilados en 2100 incluye el área actualmente sujeta a estos procesos y cubre un área total de 428,6 ha, lo que corresponde a un aumento del 13 % en comparación con el área susceptible actual. Los principales aumentos en la susceptibilidad a este peligroso proceso ocurrirán en el sector al oeste de Portinho da Arrábida, en el sector entre Outão y Figueirinha y entre Comenda y Albarquel.

3.2 Exposición

Inestabilidad de la pendiente

La exposición a la inestabilidad de taludes se obtuvo cruzando los elementos expuestos considerados (edificios residenciales, población residente, equipos y carreteras y ferrocarriles), con el resultado de la agregación de las cuatro clases de mayor susceptibilidad a la inestabilidad de taludes (clases I, II, III y IV) (Figura 13). Como ya se mencionó, el mapa de susceptibilidad a la inestabilidad de la cadena es válido para el presente y el futuro.

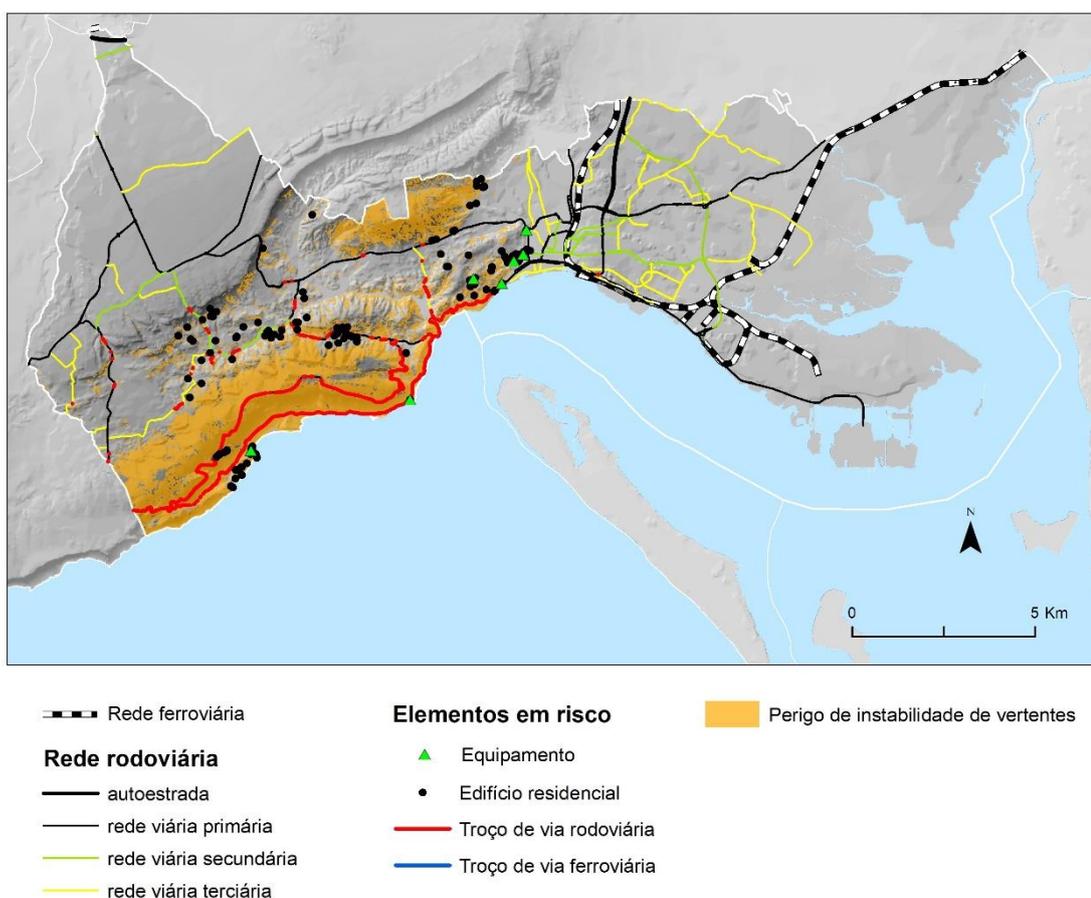


Figura 13. Edifícios residenciais, vialidades y equipamientos expuestos en zonas susceptibles de inestabilidad de taludes en el municipio de Setúbal.

Se identificaron un total de 193 edificios residenciales expuestos, correspondientes a 387 alojamientos y una población estimada de 557 individuos. Estos edificios se encuentran en la parte occidental del municipio, en la zona de Arrábida, con énfasis en la vertiente norte de la Serra de S. Francisco y Vale da Rasca. También hay un conjunto de edificios expuestos en la ciudad de Setúbal, en el barrio de Viso, así como otro núcleo de edificios en Portinho da Arrábida.

Además, siete equipos estratégicos, vitales y/o sensibles se encontraban expuestos al peligro de inestabilidad del cobertizo (Figura 13), especialmente el Hospital Ortopédico de Outão, el hogar de 3ª edad de S. Filipe y la guardería de la Asociación Portuguesa de Padres y Amigos del Ciudadano Con Discapacidad Mental de Setúbal. También están expuestos a este peligro el Centro Cultural Casa Luísa Todi, el Club Recreativo Palhavã y dos hoteles rurales, uno en Alto de S. Filipe y el otro en Portinho da Arrábida.

Los tramos de carreteras en peligro de inestabilidad de taludes suman 71,7 km y corresponden esencialmente a tramos de redes de carreteras primarias y secundarias (42,3 km y 24,2 km, respectivamente). Cabe destacar la carretera de acceso a las playas de Figueirinha, Galapos y Portinho da Arrábida, así como la carretera de la sierra de Arrábida (EN 379-1) y algunos tramos de la EN 10. No hay autopistas ni autopistas amenazadas por este tipo de peligro y la extensión de la red de carreteras terciarias expuestas es residual (solo 0,8 km).

Inundaciones rápidas

Como se describe para la inestabilidad de la hebra, el mapa de susceptibilidad a las inundaciones por inundaciones rápidas es válido para el presente y el futuro. Figura 14 muestra edificios residenciales, equipamientos y tramos de carreteras y vías férreas expuestos a este peligro en el municipio de Setúbal.

Identificamos 1779 edificios residenciales ubicados en zonas amenazantes por inundaciones rápidas, esencialmente en el centro de la ciudad de Setúbal (1611 edificios en riesgo), en el lecho inundable de Ribeira do Livramento, y en Brejos de Azeitão (158 edificios), en la parte NW del municipio, en lechos llenos de pequeños arroyos afluentes de la Acequia Real.

Los edificios residenciales en riesgo corresponden a 8688 alojamientos y una población expuesta estimada de 14480. La población expuesta se encuentra principalmente en Setúbal, en el lecho de inundación del río Livramento (14037 individuos), mientras que en Brejos de Azeitão el número de residentes expuestos asciende a 424.

Adicionalmente, existen 64 equipos estratégicos, vitales y/o sensibles expuestos a inundaciones rápidas en el municipio de Setúbal. La mayor parte de este equipo se encuentra en la ciudad de Setúbal, en el lecho de inundación del río Livramento. Hay 10 equipos de salud expuestos, incluyendo la Unidade de Saúde Familiar Luísa Tody, la Unidad de Atención Comunitaria De la Península Azul y 8 farmacias. En cuanto al

equipamiento educativo, se identificaron 16 elementos expuestos, entre ellos 12 escuelas primarias, guarderías y/o jardines infantiles, donde la reducción de la edad de los niños presentes agrava el riesgo. Casi todos estos equipos (15 casos) se encuentran en la ciudad de Setúbal, en el cauce del río Livramento. Son 20 equipos administrativos y 3 conectados a protección civil expuestos al riesgo de inundación rápida, todos ubicados en la ciudad de Setúbal. Destacan 8 edificios de la Municipalidad de Setúbal, entre ellos la Alcaldía y el edificio donde funcionan los servicios técnicos; y 3 edificios de la Policía de Seguridad Pública, incluyendo el cuartel general de mando y la sección de tránsito. También se identificaron 6 equipamientos culturales y 9 equipamientos sociales en superposición con las zonas amenazadas por inundaciones rápidas, todos en la ciudad de Setúbal y en la zona de influencia del diluvio del río Livramento. En el caso de las instalaciones sociales, hay 2 hogares de ancianos, 4 centros de cuidado diurno y el centro de actividades ocupacionales de la Asociación Portuguesa de Padres y Amigos del Ciudadano con Discapacidad Mental de Setúbal. Finalmente, se identificaron 6 establecimientos hoteleros expuestos al peligro de inundación rápida, todos ubicados en la parte baja de la ciudad de Setúbal.

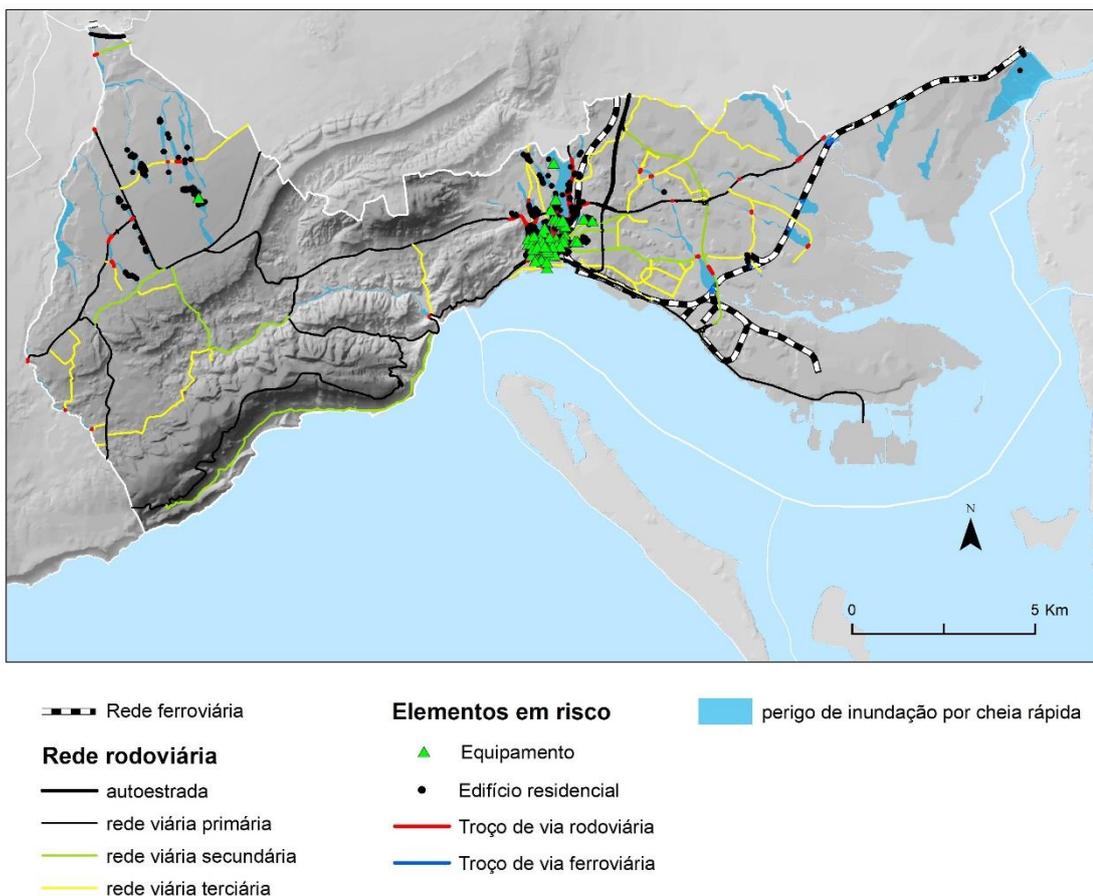


Figura 14. Edifícios residenciais y carreteras expuestas en zonas susceptibles a inundaciones rápidas en el municipio de Setúbal.

Los tramos de carreteras en peligro de inundación rápida (Figura 14) suman 15,6 km y corresponden esencialmente a la red vial primaria (8,5 km), en gran parte dentro del perímetro urbano de la ciudad de Setúbal. Las redes de carreteras secundarias y terciarias susceptibles de inmersión rápida por inundaciones suman 3,4 km y 3,5 km de longitud, respectivamente. Las autopistas/autopistas están mucho menos expuestas al peligro del tráfico rápido, que se produce solo en un pequeño tramo de en 10-8, con 228 m de extensión.

Dos tramos del ferrocarril también están expuestos al peligro de inundaciones rápidas (Figura 14), uno en la Línea Sur, de unos 800 m de longitud, y el otro cerca de la intersección de una extensión privada con la Línea Sur, en Praias do Sado (61 m de largo).

Inundaciones en los estuarios

La exposición a las inundaciones estuarinas proyectada para el final del siglo XXI es bastante contrastada en comparación con el presente. Por otro lado, se proyectan diferencias significativas para el futuro, dependiendo del escenario climático prevaleciente.

Los edificios residenciales y las carreteras actualmente expuestas al peligro de inundación del estuario se muestran en la Figura 15. Se identificaron tres edificios ubicados en zonas amenazadas por inundaciones estuarinas, correspondientes a 5 alojamientos y que albergan a unas 19 personas. Estos edificios se encuentran en el lugar de Faralhão, en la parte oriental del municipio de Setúbal, en los alrededores occidentales del estuario del Sado. Actualmente no existe ningún equipo expuesto a este tipo de peligro.

Los tramos de carreteras en riesgo de inundación estuarina suman 1,1 km y corresponden principalmente a la red de carreteras primarias (0,7 km), incluida la ruta de acceso a las instalaciones de reparación naval de Lisnave. Las autopistas/autopistas expuestas a inundaciones en la ría se extienden por 0,3 km, mientras que la exposición de la red de carreteras secundarias y terciarias es residual.

Dos pequeños tramos de ferrocarril se hincharon hasta el peligro de inundaciones estuarinas (Figura 15), uno en la Línea Sur (136 m de largo), y el otro cerca de la intersección de una extensión privada con la Línea Sur, en Praias do Sado (73 m de largo).

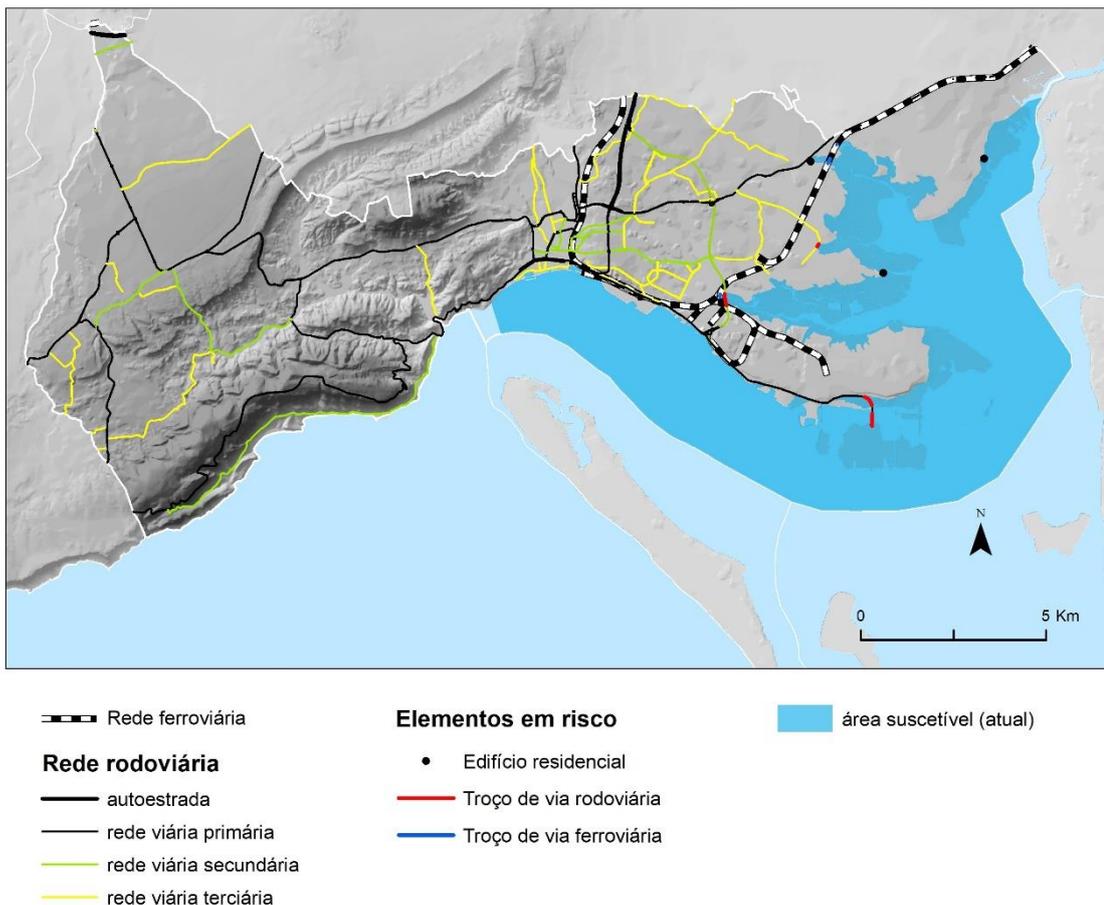


Figura 15. Elementos actualmente expuestos en zonas susceptibles de inundación estuarina en el municipio de Setúbal.

La exposición aumentará enormemente a finales del siglo XXI, en el escenario RCP 4.5, debido al aumento del nivel del mar. particularmente en el frente ribereño de la ciudad de Setúbal y en el interior circundante del estuario del Sado, en el área de las playas de Sado, Faralhão, Pontes, Algeruz y Gambia (Figura 16).

Los edificios expuestos serán 528, correspondientes a 807 alojamientos y una población residente expuesta estimada en 1576 individuos. Además, se expondrán 16 equipos estratégicos, vitales y/o sensibles, casi todos en la ciudad de Setúbal, incluyendo 8 equipos de administración, 3 equipos de agentes de protección civil (incluyendo el edificio de bomberos voluntarios), un equipo de salud y 4 equipos culturales.

Los tramos de carreteras en riesgo de inundación estuarina ascenderán a 16,4 km, correspondiendo esencialmente a la red viaria primaria (11 km). Las autopistas/autopistas expuestas a inundaciones en el estuario se extenderán por 1,5 km, mientras que la exposición de la red de carreteras terciarias cubrirá 3,5 km.

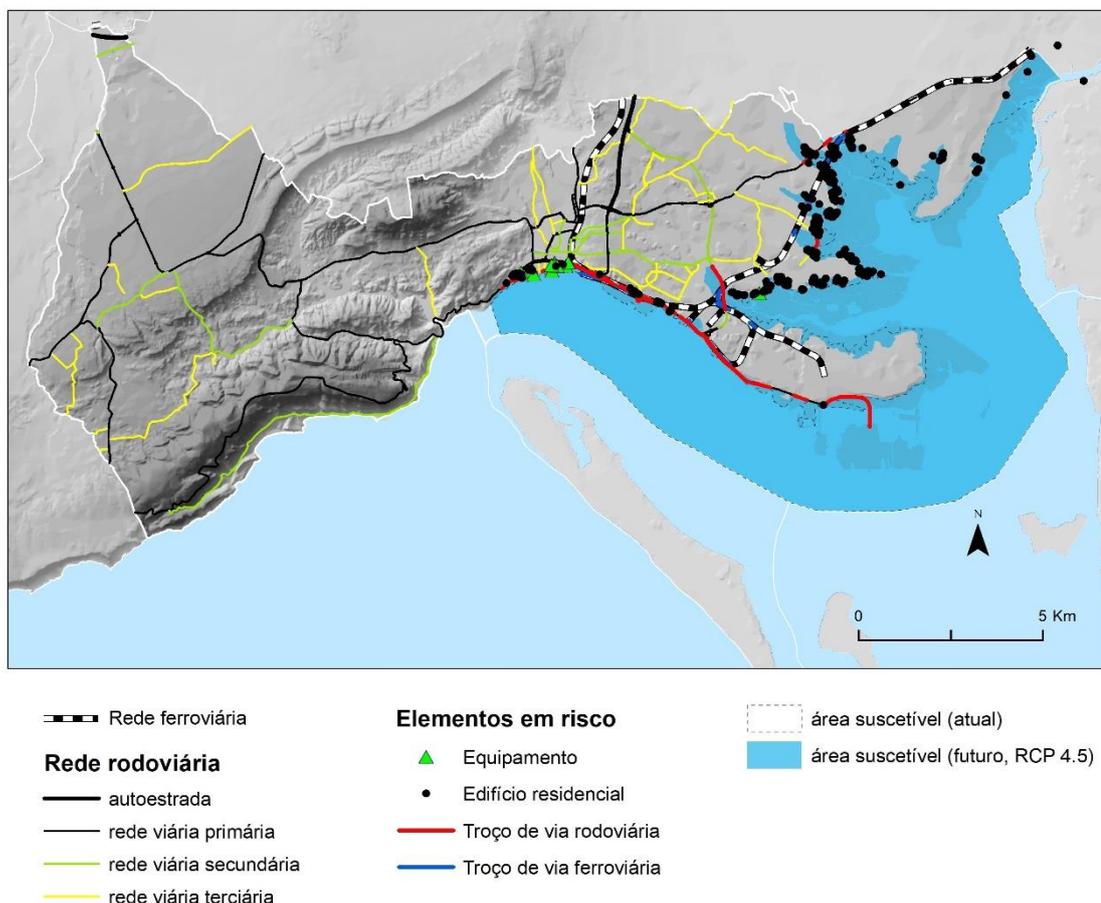


Figura 16. Elementos expuestos en el futuro (2100) en zonas susceptibles de inundación estuarina en el municipio de Setúbal (Escenario RCP 4.5).

Los tramos de la red ferroviaria en riesgo de inundación estuarina sumarán ya 7,8 km de longitud, con énfasis en un tramo de la Línea Sur, con 3,9 km de longitud, otras ampliaciones de acceso al puerto de Setúbal y empresas ubicadas en la península de Mitrena.

En el caso del escenario de RCP 8.5, los efectos sobre la exposición al riesgo de inundación de estuarios se marcarán aún más (Figura 17).

Los edificios expuestos serán en número de 649, correspondientes a 958 alojamientos y una población residente expuesta estimada en 1866 individuos. Además, se expondrán 18 equipos estratégicos, vitales y/o sensibles, casi todos en la ciudad de Setúbal. A los 16 ya mencionados para el escenario 4.5 del PCR, se agrega otro equipamiento cultural y otros equipamientos hoteleros.

Los tramos de carreteras en riesgo de inundación estuarina supondrán 18,1 km, correspondiendo esencialmente a la red viaria primaria (12,4 km). Las

autopistas/autopistas expuestas a inundaciones en la ría serán las mismas que las identificadas para la RCP 4,5 (1,5 km), pero la exposición de la red viaria terciaria aumentará a 4,2 km.

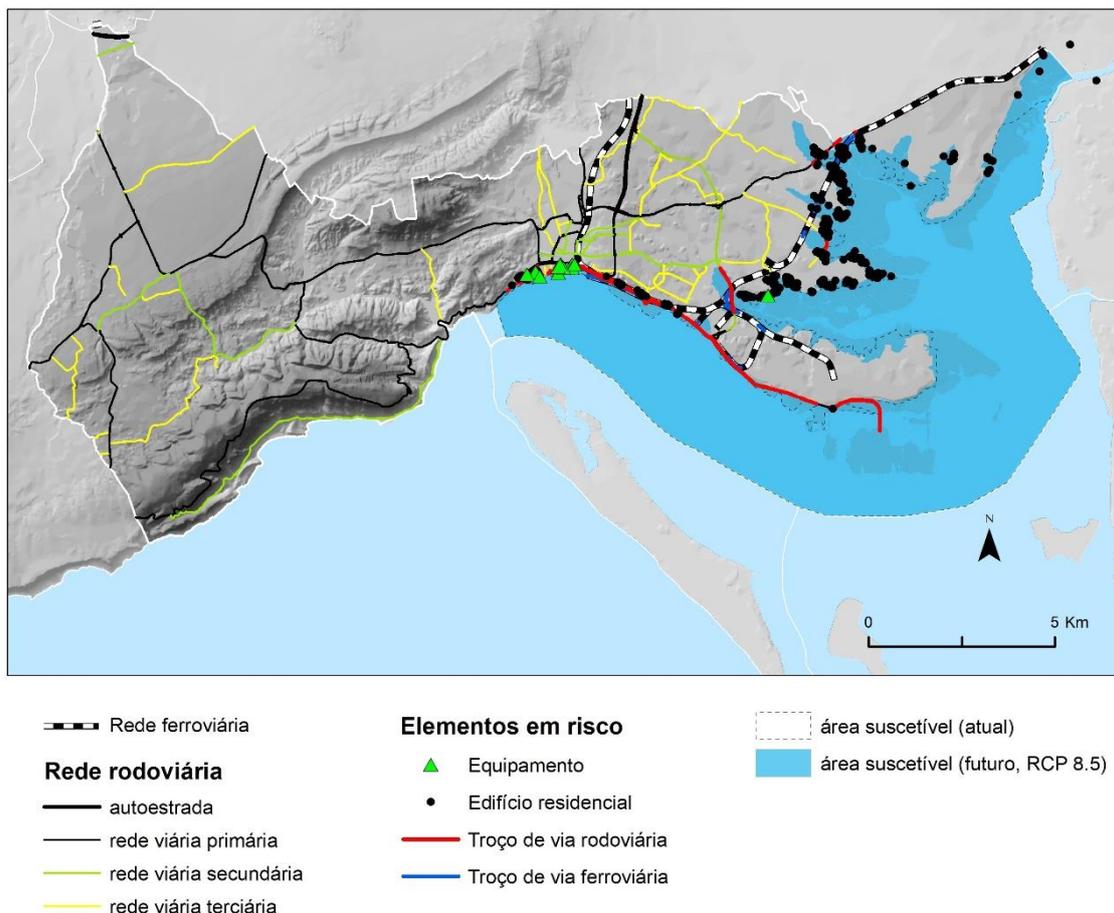


Figura 17. Elementos expuestos en el futuro (2100) en zonas susceptibles de inundación estuarina en el municipio de Setúbal (Escenario RCP 8.5).

Inundaciones costeras y rebases del oleaje

La exposición a las inundaciones costeras y rebase del oleaje proyectada para finales del siglo XXI no es muy diferente de la situación actual, debido a la naturaleza confinada y empotrada de las playas del municipio de Setúbal.

Identificamos 19 edificios residenciales ubicados en áreas actualmente amenazadas por el mar, todos ubicados en Portinho da Arrábida (Figura 18). Estos edificios corresponden a 23 alojamientos, pero solo 4 residentes, por lo que se concluye que en su mayoría son edificios de segunda vivienda, utilizados predominantemente durante la temporada de verano. No se identifican equipos estratégicos, vitales y/o sensibles actualmente expuestos a este peligro climático.

Las carreteras con riesgo de inundación y/o de costa suman 0,9 km y corresponden esencialmente a la red de carreteras primarias (0,6 km), concretamente en la EN 10-4, en los alrededores del Parque de la Comenda. También está amenazado un tramo de la red de carreteras secundarias en la playa de Figueirinha, de unos 300 m de longitud.

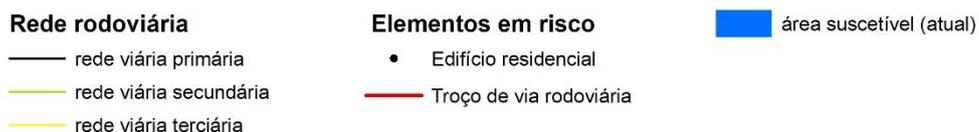
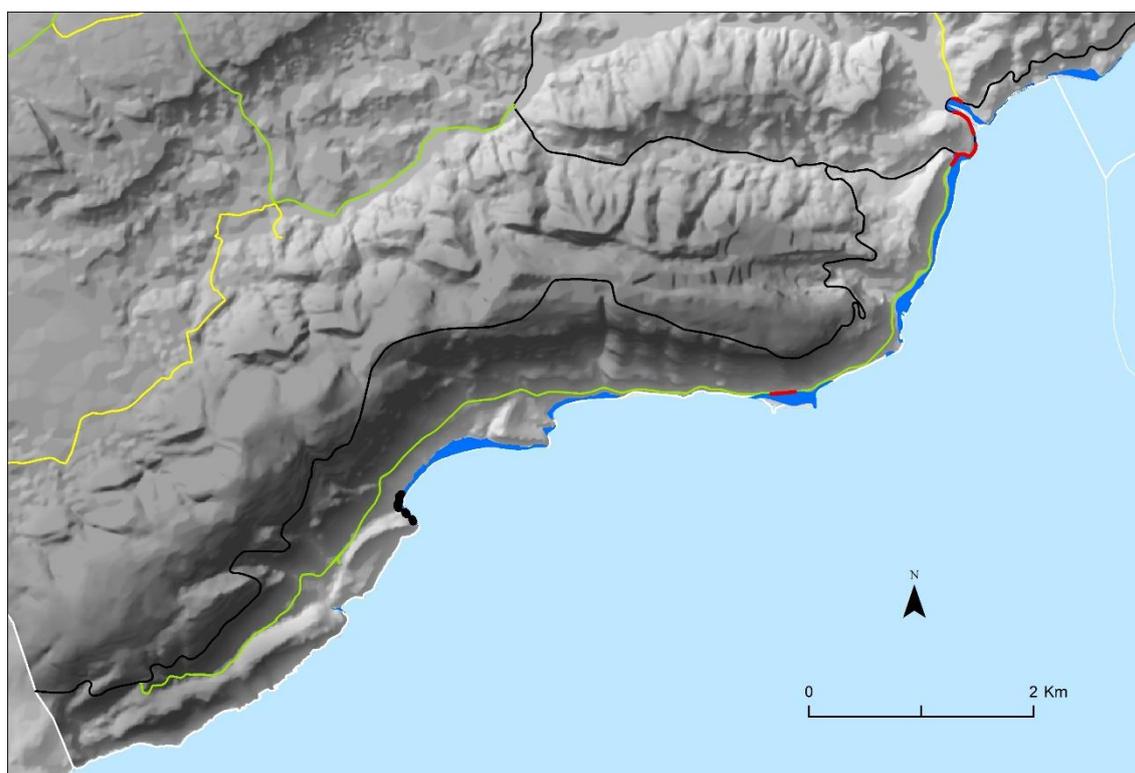


Figura 18. Elementos actualmente expuestos en zonas susceptibles de inundación y/o desbordamiento costero en el municipio de Setúbal.

A finales del siglo XXI, en el escenario RCP 4.5, los edificios expuestos serán 20, correspondientes a 24 alojamientos, pero la población residente se mantiene en los 4 individuos. Además, un equipo turístico correspondiente a un hotel rural en Portinho da Arrábida estará expuesto a este peligro (*Figura 19*).

Las carreteras con riesgo de inundación y/o rebases del oleaje costeros suman 2,0 km y corresponden esencialmente a la red viaria secundaria (1 km) y primaria (0,8 km).

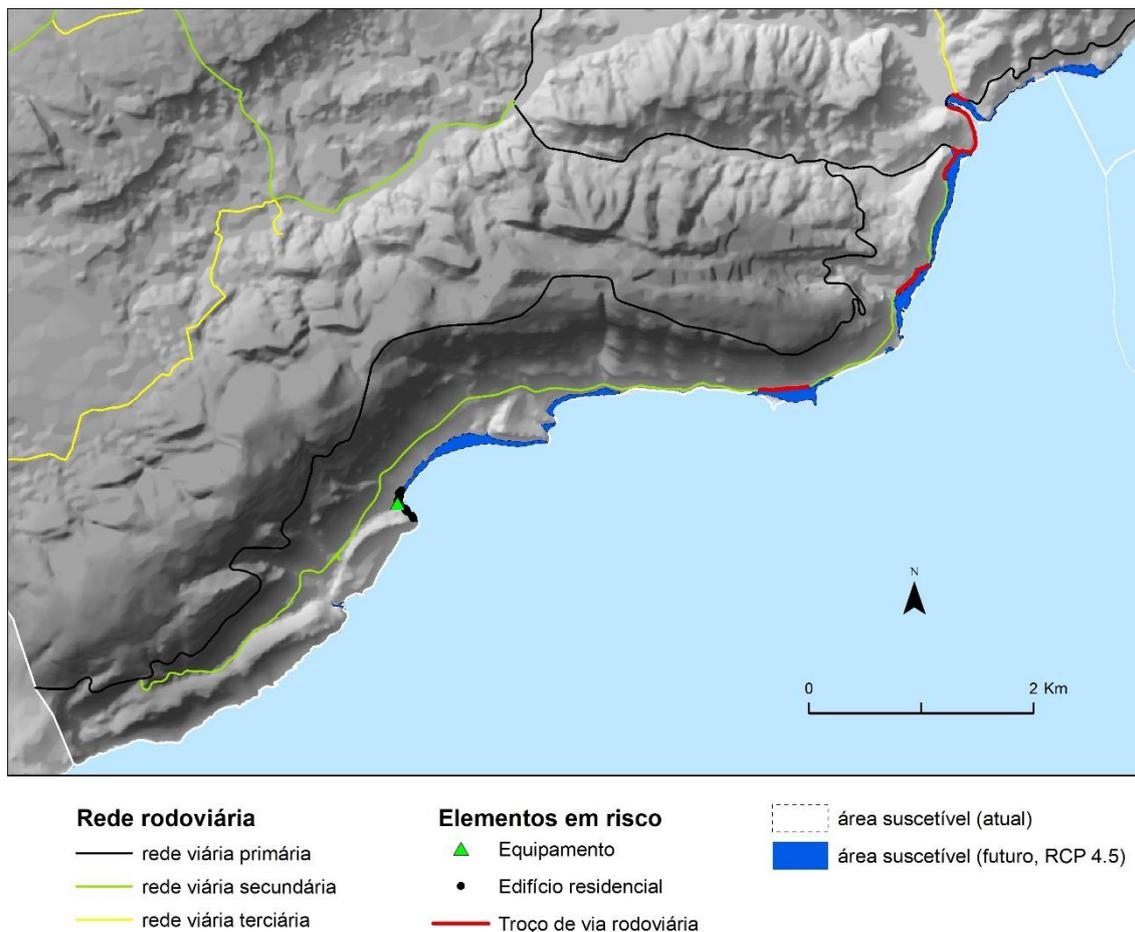


Figura 19. Elementos expuestos en el futuro (2100) en zonas susceptibles de inundación y/o desbordamiento costero en el municipio de Setúbal (RCP 4.5).

En el caso del escenario de RCP 8.5, los efectos sobre la exposición al riesgo de inundaciones y/o sobrepaso oceánicas serán muy similares a los proyectados para la RCP 4.5 (Figura 20). Los mismos 20 edificios continuarán exhibiéndose, correspondientes a 24 alojamientos y 4 personas residentes. Todavía habrá un solo equipo turístico en exhibición.

Las carreteras con riesgo de inundación y/o acolchado costero suman 2,1 km y corresponden esencialmente a la red viaria secundaria (1,2 km) y primaria (0,9 km).

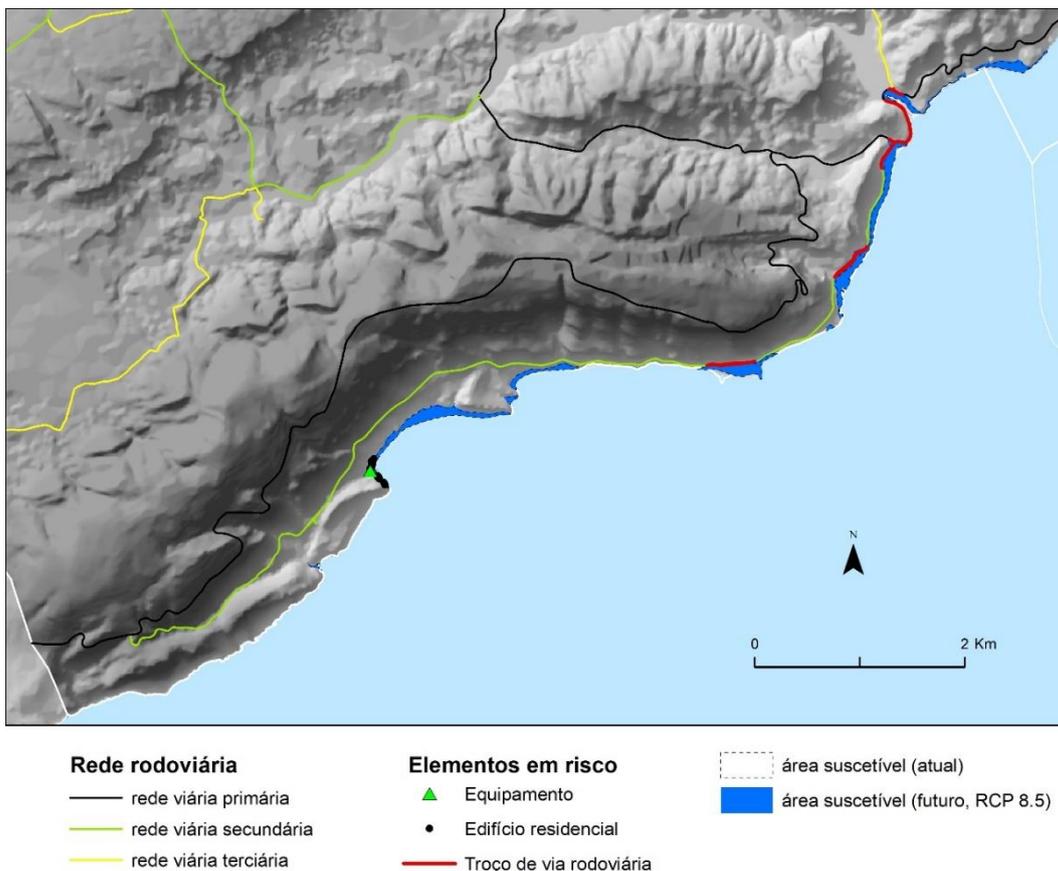


Figura 20. Elementos expuestos en el futuro (2100) en zonas susceptibles de inundación y/o desbordamiento costero en el municipio de Setúbal (RCP 8.5).

Erosión costera y retroceso de acantilados

Figura 21 representa edificios residenciales y carreteras actualmente expuestos al peligro de erosión costera y retroceso de acantilados en el municipio de Setúbal. Identificamos 18 edificios residenciales ubicados en áreas susceptibles a la erosión costera y al retroceso de acantilados en Alpertuche, Portinho da Arrábida, Comenda y Albarquel. Estos edificios corresponden a 21 alojamientos, pero solo 4 residentes, por lo que se concluye que en su mayoría son edificios de segunda vivienda, utilizados predominantemente durante la temporada de verano, como se observa en edificios expuestos a inundaciones y / o rebases del oleaje costeros. No existe ningún equipo estratégico, vital y/o sensible actualmente expuesto a este tipo de peligro.

Las rutas viales en riesgo de erosión costera y retroceso de acantilados suman 7,9 km y corresponden a la red de carreteras primarias (2,7 km), incluidas las EN 10-4 (entre Setúbal y Comenda) y EN 379-1 (carretera de montaña arrábida), y la red de carreteras secundarias (5,2 km), incluida la carretera que da acceso a las playas de Figueirinha, Galapos y Portinho da Arrábida.

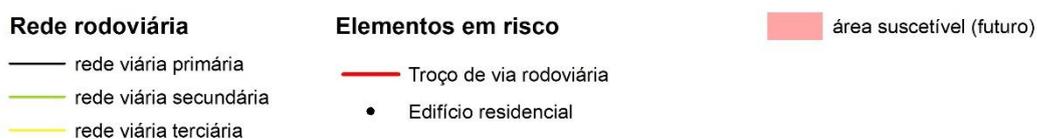
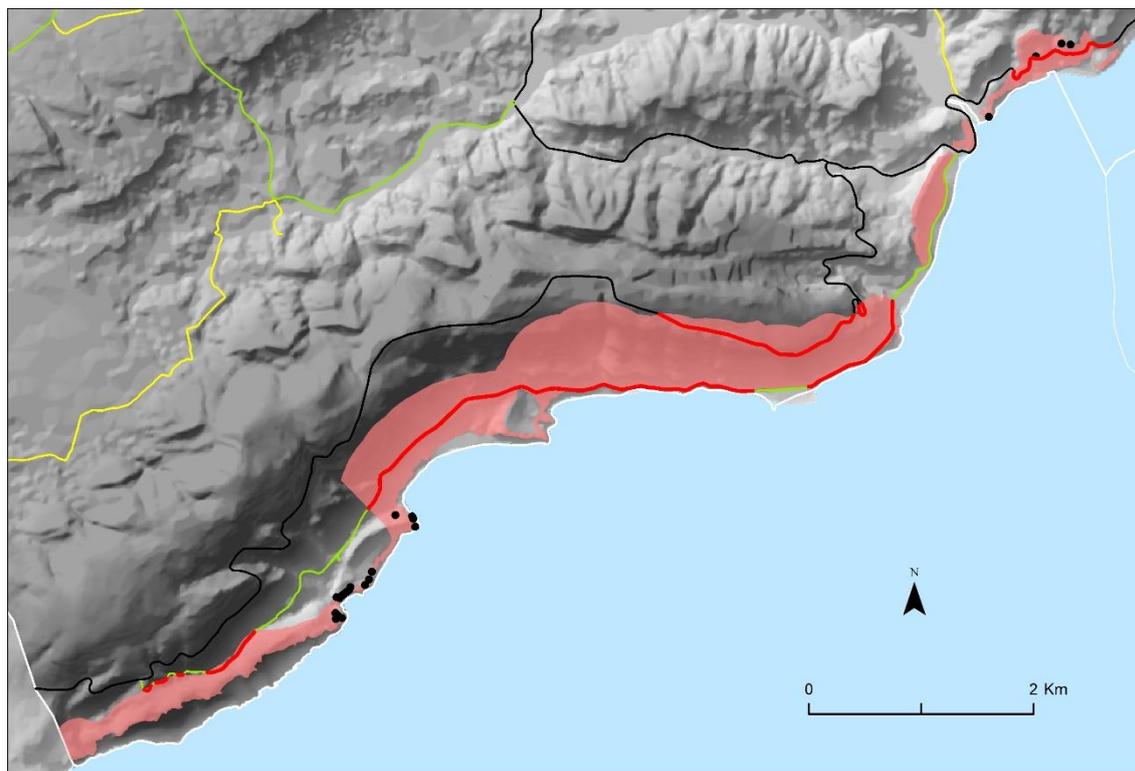
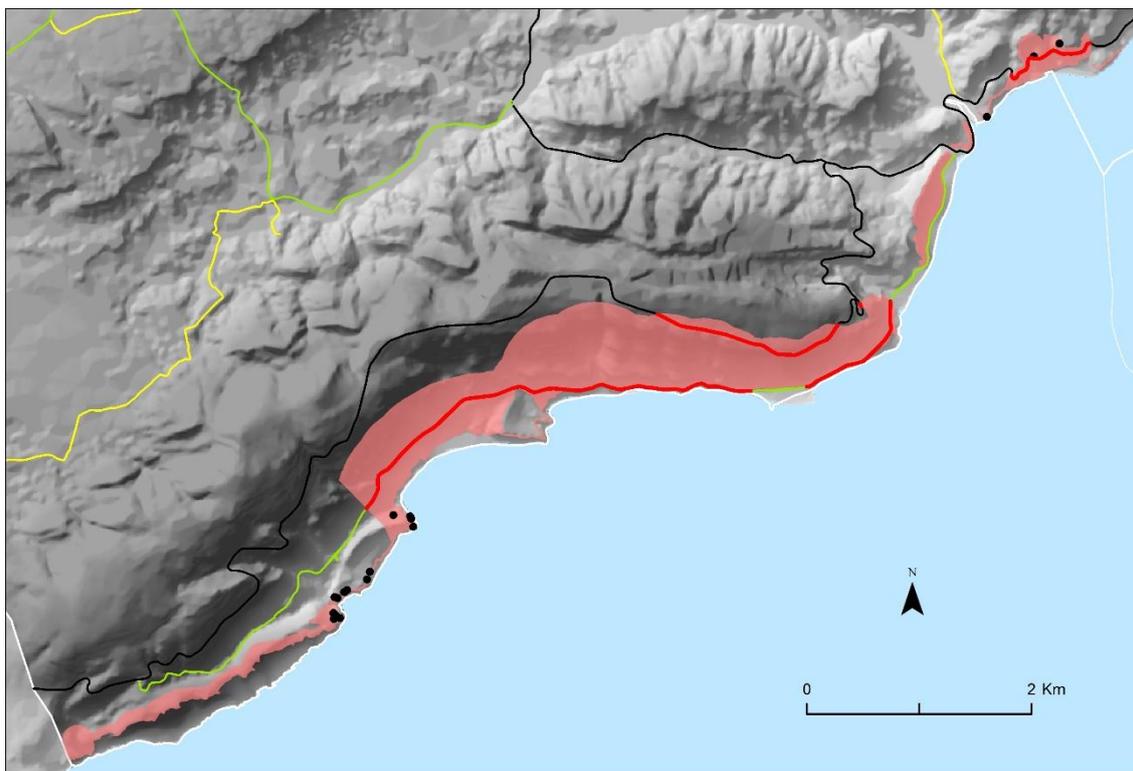


Figura 21. Elementos actualmente expuestos en zonas susceptibles a erosión costera y retroceso de acantilados en el municipio de Setúbal.

La exposición a la erosión costera y el retroceso de los acantilados proyectados hacia el final del siglo XXI no es muy diferente de la observada hoy en día. Veintitres edificios residenciales, que corresponden a 26 alojamientos y 6 personas residentes, deben estar expuestos a este peligro climático. Seguirá sin haber equipos estratégicos, vitales y/o sensibles expuestos a este tipo de peligros.

Las carreteras con riesgo de erosión costera y retroceso de acantilados totalizarán 9,3 km, correspondientes a la red de carreteras primarias (3,3 km) y a la red de carreteras secundarias (6 km).



Rede rodoviária

- rede viária primária
- rede viária secundária
- rede viária terciária

Elementos em risco

- Edifício residencial
- Troço de via rodoviária

 área suscetível (atual)

Figura 22. Elementos expuestos en el futuro en zonas susceptibles de erosión costera y retroceso de acantilados en el municipio de Setúbal (RCP 4.5 y RCP 8.5).

En las tablas 8, Tabla 9 Tabla 10 se resumen los resultados de la evaluación de la exposición a los peligros climáticos considerados (inestabilidad de taludes; inundación por inundaciones rápidas; inundación de estuario; inundaciones costeras y rebase del oleaje; y erosión costera y retroceso de acantilados) en el municipio de Setúbal, actualmente y a finales del siglo XXI, en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

Tabla 8. Síntesis de los elementos actualmente expuestos a peligros climáticos en el municipio de Setúbal.

	Elementos Expuestos	Perigos climáticos atuais					Total
		Instabilidade de vertentes	Inundações fluviais	Inundações estuarinas	Inundações e galgamentos costeiros	Erosão e recuo de arribas	
Edifícios e residentes	Edifícios (n)	193	1779	3	19	18	2175
	Alojamentos (n)	387	8688	5	23	21	9295
	População residente (n)	557	14480	19	4	4	15250
Equipamentos estratégicos, vitais e sensíveis	Equipamentos de administração (n)	0	20	0	0	0	20
	Equipamentos ligados à proteção civil (n)	0	3	0	0	0	3
	Equipamentos de saúde (n)	1	10	0	0	0	11
	Equipamentos de educação (n)	0	16	0	0	0	16
	Equipamentos sociais (n)	2	9	0	0	0	12
	Equipamentos culturais (n)	2	6	0	0	0	8
	Equipamentos turísticos (n)	2	0	0	0	0	2
Vias	Autoestradas e vias rápidas (km)	0,000	0,228	0,32	0,000	0,000	0,549
	Rede viária primária (km)	17,434	8,475	0,66	0,602	2,710	51,358
	Rede viária secundária (km)	9,285	3,369	0,00	0,319	5,181	27,336
	Rede viária terciária (km)	0,801	3,523	0,08	0,007	0,000	7,425
	Ferrovias (km)	0,000	0,855	0,209	0,000	0,000	2,265

Tabla 9. Síntesis de los elementos expuestos en el futuro a peligros climáticos en el municipio de Setúbal (RCP 4.5)

	Elementos Expuestos	Perigos climáticos futuros (RCP 4.5)					Total
		Instabilidade de vertentes	Inundações fluviais	Inundações estuarinas	Inundações e galgamentos costeiros	Erosão e recuo de arribas	
Edifícios e residentes	Edifícios (n)	193	1779	528	20	23	3243
	Alojamentos (n)	387	8688	807	24	26	10672
	População residente (n)	557	14480	1576	4	6	17533
Equipamentos estratégicos, vitais e sensíveis	Equipamentos de administração (n)	0	20	8	0	0	28
	Equipamentos ligados à proteção civil (n)	0	3	3	0	0	6
	Equipamentos de saúde (n)	1	10	1	0	0	12
	Equipamentos de educação (n)	0	16	0	0	0	16
	Equipamentos sociais (n)	2	9	0	0	0	12
	Equipamentos culturais (n)	2	6	4	0	0	13
	Equipamentos turísticos (n)	2	0	0	1	0	3
Vias	Autoestradas e vias rápidas (km)	0,000	0,228	1,538	0,000	0,000	1,821
	Rede viária primária (km)	17,434	8,475	11,040	0,849	3,274	77,833
	Rede viária secundária (km)	9,285	3,369	0,000	1,092	6,007	31,805
	Rede viária terciária (km)	0,801	3,523	3,820	0,017	0,000	21,492
	Ferrovias (km)	0,000	0,855	7,803	0,000	0,000	12,573

Tabla 10. Síntesis de los elementos expuestos en el futuro a peligros climáticos en el municipio de Setúbal (RCP 8.5)

	Elementos Expuestos	Perigos climáticos futuros (RCP 8.5)					Total
		Instabilidade de vertentes	Inundações fluviais	Inundações estuarinas	Inundações e galgamentos costeiros	Erosão e recuo de arribas	
Edifícios e residentes	Edifícios (n)	193	1779	649	20	23	4742
	Alojamentos (n)	387	8688	958	24	26	12338
	População residente (n)	557	14480	1866	4	6	20761
Equipamentos estratégicos, vitais e sensíveis	Equipamentos de administração (n)	0	20	8	0	0	29
	Equipamentos ligados à proteção civil (n)	0	3	3	0	0	6
	Equipamentos de saúde (n)	1	10	1	0	0	12
	Equipamentos de educação (n)	0	16	0	0	0	18
	Equipamentos sociais (n)	2	9	0	0	0	13
	Equipamentos culturais (n)	2	6	5	0	0	14
	Equipamentos turísticos (n)	2	0	1	1	0	5
Vias	Autoestradas e vias rápidas (km)	0,000	0,228	1,538	0,000	0,000	1,913
	Rede viária primária (km)	17,434	8,475	12,398	0,853	3,274	86,127
	Rede viária secundária (km)	9,285	3,369	0,000	1,181	6,007	33,346
	Rede viária terciária (km)	0,801	3,523	4,171	0,017	0,000	31,785
	Ferrovias (km)	0,000	0,855	8,345	0,000	0,000	16,768

3.3 Vulnerabilidad

La aplicación de los procedimientos descritos en la sección 2.3 condujo a la selección de 27 variables para la carrera inicial del ACC de evaluación de criticidad (Tabla 11). Tras la eliminación iterativa de redundancias entre variables y la interpretación de los componentes principales y sus variables explicativas, se retuvieron un total de 12 variables (Tabla 11).

Para las 12 variables retenidas, hay un valor de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de 0,722 y un porcentaje de varianza total, explicado por los 4 componentes principales (FAC), del 73,7 %.

La matriz de componentes redondos (Tabla Tabla 12) permite interpretar la dimensión de criticidad a representar en cada FAC.

A partir de estos elementos estadísticos, se consideran representadas en el modelo final de criticidad las siguientes dimensiones: empleo y cualificaciones (FAC1), que explica el 32,5 % de la varianza total; edad, sexo y contexto urbano envejecido (FAC2), que explica el 22,5 % de la varianza total; condiciones de vivienda (FAC3), lo que explica el 10,3% de la varianza total; y estructura familiar (FAC4), que explica el 8,4% de la varianza total.

Tabla 11. Lista de variables utilizadas inicial e iterativamente en ACP e indicación de las variables retenidas en el modelo de criticidad final, en la 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_employa	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
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 (nº)	No
Rel_Mascul	Relación de la masculinidad	No
Pop_femi	Proporción de población femenina en la población total residente (%)	Si

Tabla 12. Matriz de componentes redonda a criticidad, identificando los componentes principales, su cardinalidad y % de varianza explicativa, y sus 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

Los valores de criticidad del municipio de Setúbal se encuentran dentro del universo de valores calculados para la AML, es decir, en las 192 secciones del municipio los valores se contextualizan en las 4521 secciones estadísticas de la 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 en el AML (0,49).

La expresión cartográfica identifica como secciones estadísticas más críticas aquellas ubicadas en el centro urbano de Setúbal, perteneciente a la parroquia de S. Julião, N. S. da Anunciación y Sta. Maria da Graça y parroquia de Setúbal (São Sebastião) (Figura 23). Algunas secciones estadísticas están más alejadas del centro, con una criticidad muy alta, en las áreas de Viso, Troino, Rua Senhor Jesus dos Aflitos y Casal das Figueiras, al este, y Camarinha y Bairro da Boavista, al oeste.

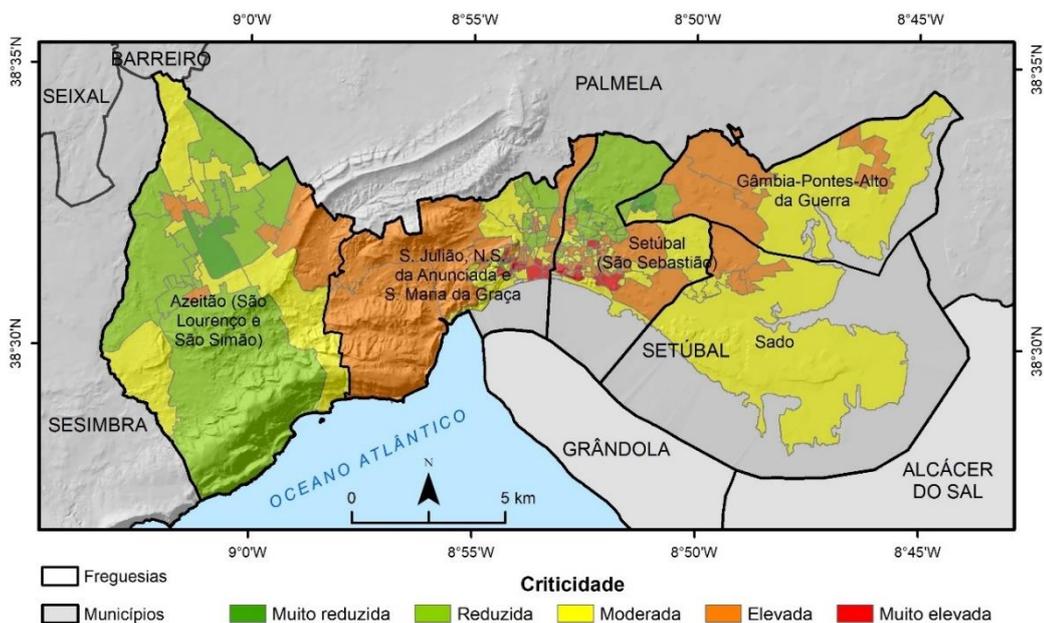


Figura 23. Vulnerabilidad Social (Criticidad) en el municipio de Setúbal, a nivel de la sección estadística.

3.4 Análisis del riesgo

Figura 24 muestra la vulnerabilidad social (criticidad) en las secciones estadísticas del municipio de Setúbal, reclasificadas en una escala entre 0 y 1, como resultado de la aplicación de la ecuación (7). Los resultados de la vulnerabilidad social reflejan esencialmente los datos del Censo de 2011 y se utilizan en el análisis del riesgo actual y futuro. La incertidumbre de esta variable y los datos en los que se basa son demasiado altos para sostener proyecciones creíbles para el final del siglo XXI.

La aplicación de la ecuación (5), teniendo en cuenta los mapas de susceptibilidad producidos para la inestabilidad de la hebra, las inundaciones debidas a inundaciones rápidas, las inundaciones estuarinas, las inundaciones costeras y rebase del oleaje, y la erosión costera y el respaldo de acantilados, permitió evaluar la susceptibilidad a múltiples peligros para el presente y el futuro, en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 (Figura 25).

La Figura 26 muestra la exposición multi-peligro al presente y al futuro en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Como se explica en la sección 2.4, esta variable refleja la población residente expuesta en zonas susceptibles a los peligros climáticos considerados.

Figura 27 representa el mapeo del Índice de Riesgo Multi-peligro (IRM) en el municipio de Setúbal, obtenido con la aplicación de la ecuación (4), para el presente y para el futuro, en escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

El análisis de riesgo multi-peligro actual (Figura 27) da como resultado una resonancia magnética promedio de 0,1216 y la existencia de 112 unidades terrestres

(secciones estadísticas) con riesgo cero. Adicionalmente, se identifican 22 unidades de terreno con mayor riesgo ($IRM > 0.4$), todas ubicadas en el centro de la ciudad de Setúbal y sujetas esencialmente al peligro de inundaciones por inundaciones rápidas. Estas unidades de tierra suman una población residente expuesta estimada en 10.768 individuos, y la población total expuesta en el municipio asciende a 15.065 personas.

El análisis de riesgo multi-peligro para finales de siglo, con las condiciones climáticas definidas por el escenario DE RCP 4.5 y considerando los elementos actualmente expuestos en el territorio municipal (Figura 27), muestra un aumento del riesgo, traducido en una resonancia magnética promedio de 0.1399 y la reducción a 99 en el número de unidades de tierra con riesgo cero. No hay reducción en el Índice de Riesgo Multirriesgo en ninguna de las unidades de suelo del municipio. Además, hay 24 unidades terrestres de mayor riesgo ($MRI > 0.4$). A los que ya se destacaron en el centro de la ciudad de Setúbal, en el mapa que traduce la situación actual (Figura 27), se suman dos unidades más de terreno, ubicadas en la zona ribereña de la ciudad de Setúbal y en el interior del estuario del río Sado, traduciendo el aumento de la susceptibilidad y exposición al proceso de inundación estuarina. La población residente expuesta estimada en estas unidades de terreno asciende a 11.257 personas, mientras que la población expuesta en todo el municipio asciende a 16.620 individuos.

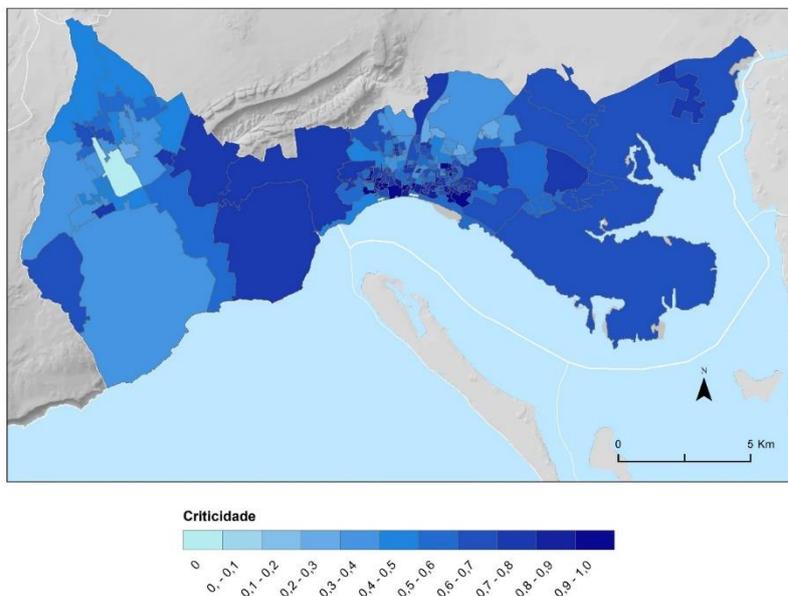


Figura 24. Vulnerabilidad social (criticidad) en el municipio de Setúbal, a nivel de la sección estadística.

El análisis de riesgo multi-peligro para finales de siglo, con las condiciones climáticas definidas por el escenario RCP 8.5 y considerando los elementos actualmente expuestos en el territorio municipal (Figura 27), muestra un aumento marginal del riesgo, en comparación con el escenario RCP 4.5, traducido en una RM promedio de 0.1427 y mantenimiento de las mismas 99 unidades terrestres de riesgo cero. Se identifican las mismas 24 unidades de terreno con mayor resonancia magnética (> 0.4) y se mantiene el número de población residente expuesta en estas unidades (11.257 personas). Sin

embargo, la población total expuesta en el municipio a los peligros climáticos considerados es mayor, totalizando 16.910 individuos.

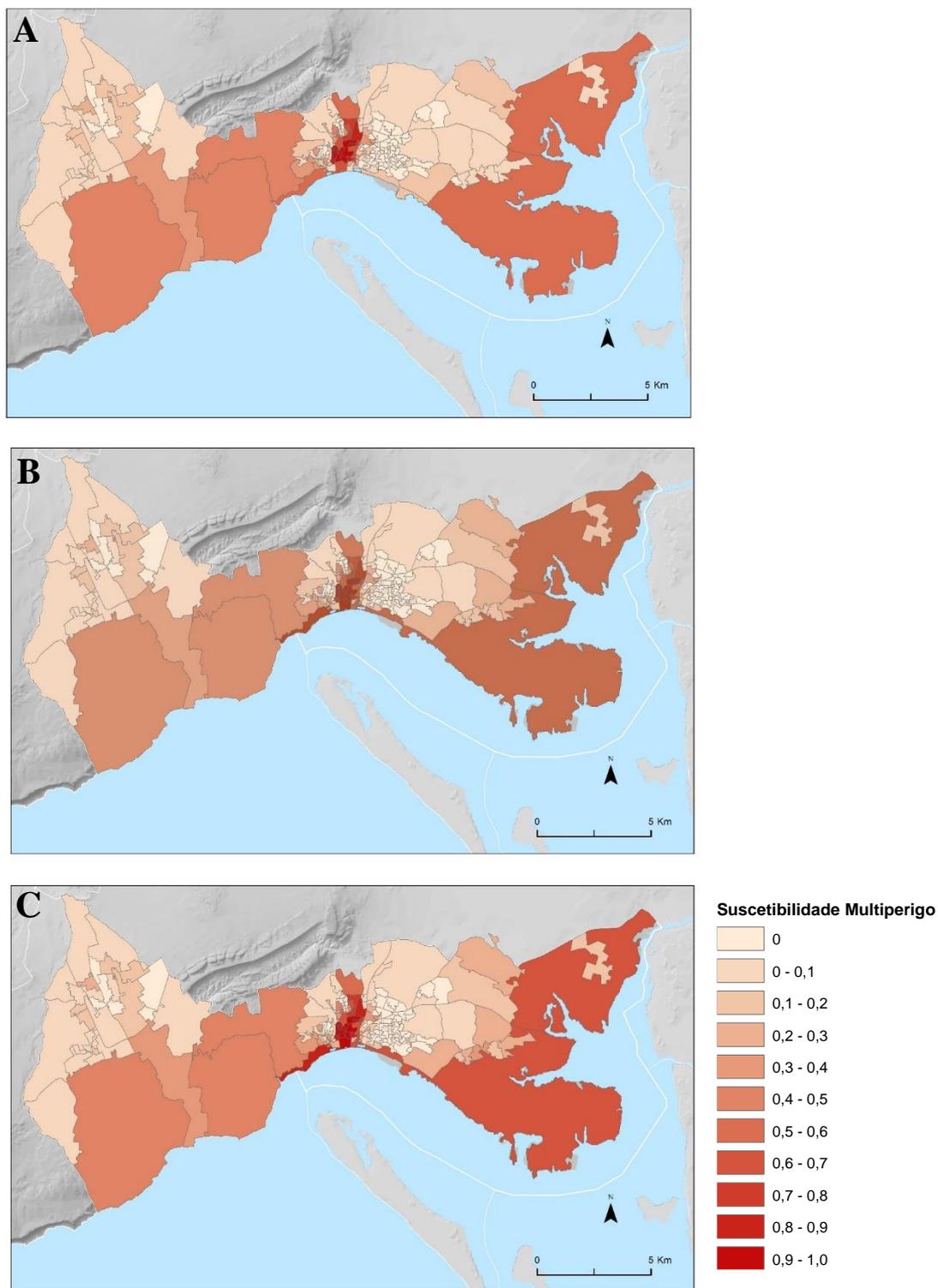


Figura 25. Susceptibilidad multi-peligros en el municipio de Setúbal, a nivel de la sección estadística. A - Actual; B - Futuro (RCP 4.5); C - Futuro (RCP 8.5).

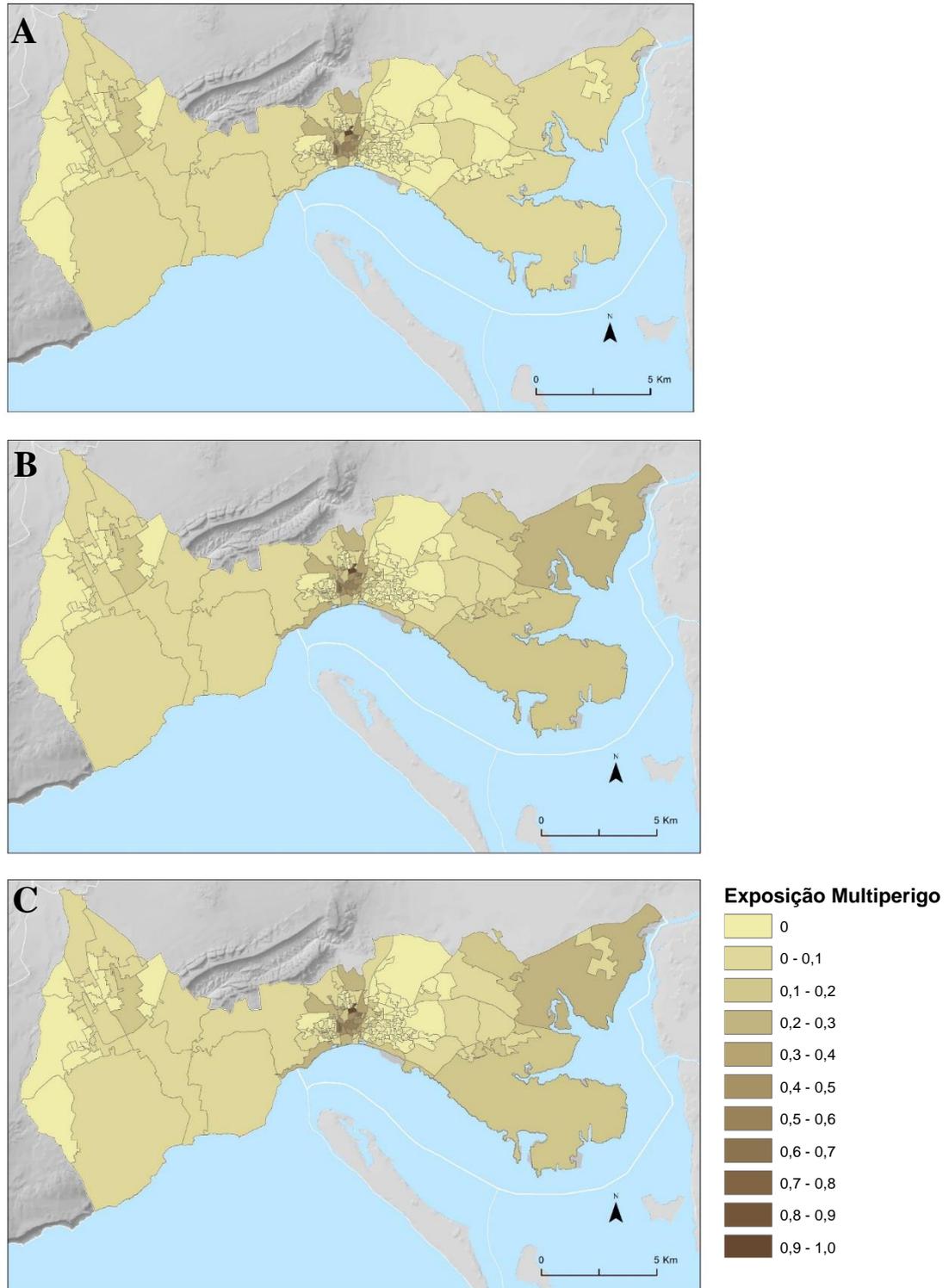


Figura 26. Exposición multi-peligro en el municipio de Setúbal, a nivel de la sección estadística. A - Actual; B - Futuro (RCP 4.5); C - Futuro (RCP 8.5).

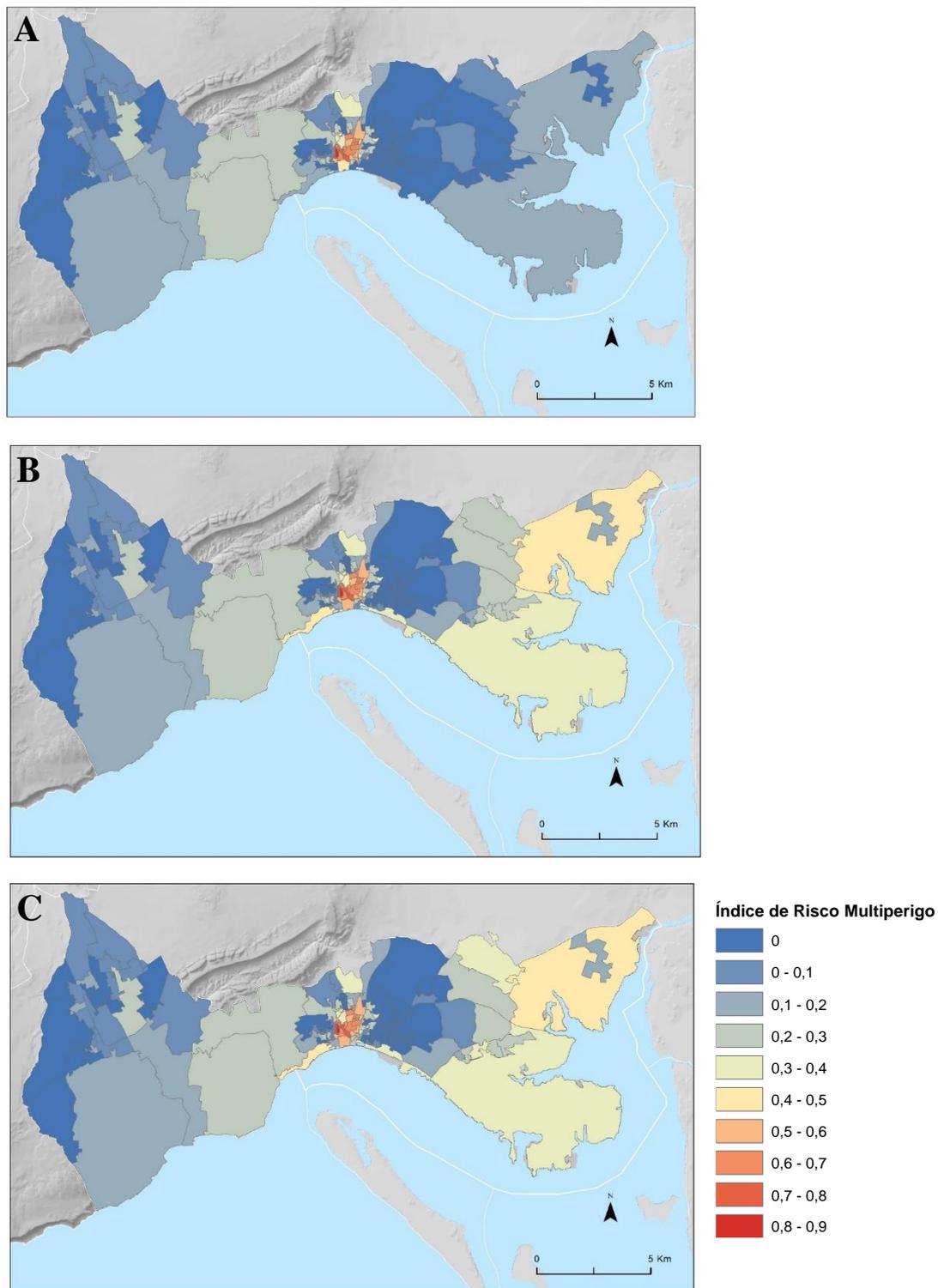


Figura 27. Riesgo multi-peligro en el municipio de Setúbal, a nivel de la sección estadística. A - Actual; B - Futuro (RCP 4.5); C - Futuro (RCP 8.5).

4. CONCLUSIONES

Los peligros climáticos con incidencia en el municipio de Setúbal fueron analizados y cartógrafos para el presente y para el horizonte temporal de referencia de finales del siglo XXI, considerando dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: RCP 4.5 y RCP 8.5. Los resultados obtenidos en la evaluación de la susceptibilidad se pueden sintetizar de acuerdo con el factor estresante que determina cada uno de los peligros considerados: aumento del nivel del mar y precipitación.

El aumento del nivel del mar condiciona directamente 3 peligros climáticos con incidencia en el municipio de Setúbal: inundaciones estuarinas; inundaciones y rebases del oleaje costeros; y la erosión costera y el retroceso de los acantilados. La NASA y el proyecto IPCC (2021) elevan el nivel del mar en la costa portuguesa a 2100 de 0,59 m y 0,79 m, respectivamente para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. En este contexto, los resultados obtenidos en este trabajo apuntan a un empeoramiento significativo de la susceptibilidad a cualquiera de los 3 peligros considerados, a finales de siglo, independientemente del escenario climático. De hecho, el diferencial de nivel del mar de 0,2 m proyectado para 2100, verificado entre los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, no se traduce en diferencias relevantes en las zonas afectadas, concretamente en las playas de Arrábida, también por su geomorfología entre acantilados rocosos.

Las precipitaciones condicionan directamente 2 peligros climáticos relevantes en el municipio de Setúbal: inundaciones rápidas e inestabilidad de taludes.

Las inundaciones debidas a inundaciones rápidas son provocadas por lluvias muy intensas y de corta duración, generalmente en períodos de menos de 24 horas. Las precipitaciones extremas que duran 1 día deberían tener un aumento de frecuencia del 9 % a finales del siglo XXI, en el escenario RCP 4.5, lo que debería traducirse en un aumento equivalente en la frecuencia de ocurrencia de inundaciones rápidas. Como resultado, la actual "inundación del centenario" ocurrirá cada 92 años. Si se materializa el escenario RCP 8.5, el aumento de frecuencia de las precipitaciones diarias extremas será de solo el 6 %, por lo que el "centenario" actual ocurrirá cada 94 años.

Los movimientos masivos en las hebras identificadas en el municipio de Setúbal son predominantemente superficiales y han sido desencadenados por intensas lluvias en períodos de pocos días consecutivos. Las proyecciones para la ocurrencia de precipitaciones extremas para el final del siglo XXI durante 10 días consecutivos indican un aumento del 5% en la frecuencia en el caso de la RCP 4.5, y una reducción de la frecuencia del 10% en el caso del escenario de RCP 8.5. Se admite que estas variaciones se traducirán directamente en la frecuencia y magnitud de los movimientos de masa en las hebras a finales del siglo XXI. En todo el territorio de Arrábida se han estimado 38.440 m² de terreno inesperado anualmente. Este valor aumentará a 40.362 m² en 2100, en el escenario RCP 4.5. Si el escenario RCP 8.5 se materializa, ese valor se reducirá a 34.596 m².

La exposición actual a los peligros considerados en el municipio de Setúbal, se traduce en edificios residenciales 2012, correspondientes a 9 124 alojamientos y una

población expuesta total estimada en 15 064 individuos. Además, hay 71 equipos estratégicos, vitales y/o sensibles expuestos, así como 53 km de red vial y 1 km de red ferroviaria. El peligro de inundaciones rápidas destaca del resto, representando más del 88% de los edificios expuestos y el 96% de la población residente expuesta. El peligro de inestabilidad de la hebra surge en una posición secundaria.

La exposición futura en el escenario climático RCP 4.5 aumentará a 2 543 edificios (aumento del 26,4 %), lo que corresponde a 9 932 viviendas (8,9 %) de aumento y 16 623 individuos (aumento del 10,3 %). El número de equipos estratégicos, vitales y/o sensibles expuestos será de 88 (un aumento del 23,9 %). Las carreteras expuestas totalizarán 70,8 km (aumento del 33,5 %), mientras que la red ferroviaria expuesta ascenderá a 8,7 km (muy por encima del valor actual). El peligro de inundaciones rápidas sigue destacando, aunque hay cierta reducción en su peso en total (70% de los edificios expuestos y 87% de la población expuesta). El peligro de inundación estuarina supera la inestabilidad de los taludes y asume la posición secundaria en la jerarquía de peligros climáticos en el municipio de Setúbal.

En el escenario 8.5 de la RCP, la exposición futura será aún mayor, afectando a 2 664 edificios, 10 083 viviendas y 16 913 personas (incrementos del 4,8 %, 1,5 % y 1,7 %, respectivamente, en comparación con la RCP 4.5). El número de equipos estratégicos, vitales y/o sensibles expuestos ascenderá a 90 (un aumento del 2,2 % en comparación con la RCP 4.5). Las carreteras expuestas totalizarán 72,6 km (aumento del 2,5 %), mientras que la red ferroviaria expuesta ascenderá a 9,2 km (aumento del 6,3 %). La jerarquía de peligros climáticos sigue siendo la misma que la identificada para el escenario RCP 8.5, con inundaciones por inundaciones rápidas en un lugar prominente, respaldadas por inundaciones estuarinas.

El análisis de riesgos de peligros múltiples, cuantificado a través del Índice MCR Actual y Futuro, en escenarios de RCP 4.5 y RCP 8.5, muestra que el riesgo al final del siglo XXI aumentará más sensiblemente en el escenario de RCP 8.5. El riesgo actual es máximo en la zona centro de Setúbal, como consecuencia de las inundaciones por inundaciones rápidas y continuará en el futuro. Sin embargo, el riesgo aumentará en toda la zona del estuario del Sado, particularmente en el frente ribereño de la ciudad de Setúbal y el entorno interior del estuario del Sado, en Praias do Sado, Faralhão, Pontes, Algeruz y Gambia.

BIBLIOGRAFÍA

- APA (2020). Cartas de Zonas Inundáveis de Riscos de Inundações RH6 – Sado e Mira. Plano de Gestão dos Riscos de Inundações 2022/2027 – 2ª fase. Novembro de 2020.
- Araújo, J.R. (2021). Impact of extreme rainfall events on landslide events in Portugal under climate change scenarios. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- De Groeve, T., Polansek, K., Vernaccini, L. (2016). Index for Risk Management - INFORM. Publicatio. ed. Publications Office of the European Union, European Union, Luxembourg.
- Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C., Zêzere, J.L. (2016). Assessing population exposure for landslide risk analysis using dasymetric cartography. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16 (12), p. 2769-2782.
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.), Cambridge University Press.
- Kulp, S.A., Strauss, B.H. (2019). New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/S41467-019-12808-Z>
- Marques, F., Andrade, C., Tabora, R., Freitas, C., Antunes, C., Mendes, T., Carreira, D. (2009). Zonas Costeiras in F.D.Santos (edit.) *Plano Estratégico do Concelho de Sintra Face às Alterações Climáticas*, Câmara Municipal de Sintra, 62 pp.
- Marques, F., Penacho, N., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P. (2013). Estudo da adequabilidade das faixas de risco/salvaguarda definidas no POOC em vigor, Entregável 1.3.3.a, Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo, Agência Portuguesa do Ambiente.
- Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H.C., Aerts, J. C., Ward, P.J. (2016). A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nature communications*, 7(1), 1-12.
- Penacho, N., Marques, F., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P., Garzón, V. (2013a). Inventário de instabilidades nas arribas obtido por fotointerpretação, Entregável 1.2.2.1.a, Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo, Agência Portuguesa do Ambiente.
- Penacho, N., Marques, F., Queiroz, S., Gouveia, L., Matildes, R., Redweik, P., Garzón, V. (2013b). Determinação e cartografia da perigosidade associada à ocorrência de fenómenos de instabilidade em arribas à escala regional, Entregável 1.3.1.a, Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo, Agência Portuguesa do Ambiente.
- 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, 139463.

PMAAC AML (2018). Plano metropolitano de adaptação ás alterações climáticas, volume I Definição do cenário base de adaptação para a AML, Consórcio CEDRU / WE CONSULTANTS / IGOT / TIS / ESRI.

Reis, E. (2011). Análise de bacias hidrográficas, susceptibilidade à ocorrências de cheias e sistemas de informação geográfica: da definição do quadro conceptual até à proposta de um modelo de avaliação. VIII Congresso da Geografia Portuguesa (p. 1–6). Associação Portuguesa de Geógrafos, Lisboa.

Santos, P.P., Reis, E., Pereira, S., Santos, M. (2019). A flood susceptibility model at the national scale based on multicriteria analysis. *Science of The Total Environment*, 667, 325-337.

Santos, P.P., Pereira, S., Zêzere, J.L., Tavares, A.O., Reis, E., Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C. (2020). A comprehensive approach to understanding flood risk drivers at the municipal level. *J. Environ. Manag.* 260

Silva, A.N., Taborda, R., Lira, C., Andrade, C.F., Silveira, T.M., Freitas, M.C. (2013a). Determinação e cartografia da perigosidade associada à erosão de praias e ao galgamento oceânico. Entregável 1.3.2.a, Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo, Agência Portuguesa do Ambiente.

Silva, A.N., Taborda, R., Lira, C., Andrade, C.F., Silveira, T.M., Freitas, M.C. (2013b). Determinação e cartografia da perigosidade associada à erosão de praias e ao galgamento oceânico na Costa da Caparica. Entregável 2.4.a, Estudo do litoral na área de intervenção da APA, I.P. /ARH do Tejo, Agência Portuguesa do Ambiente.

Taborda, R., Andrade, C., Marques, F., Freitas, M., Rodrigues, R., Antunes, C., Pólvora, C. (2010). Plano estratégico de Cascais face às alterações climáticas - Sector zonas costeiras.

Vaz, T., Zêzere, J.L., Pereira, S., Oliveira, S.C., Garcia, R.A.C., Quaresma, I. (2018). Regional rainfall thresholds for landslide occurrence using a centenary database. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(4), 1037-1054.

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, p. 1269–1272.

Zêzere, J.L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M.L., Vieira, G., Ferreira, A.B. (2004). Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(1), 133-146.

Zêzere, J.L., Trigo, R.M., Trigo, I.F. (2005). Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(3), 331-344.

Zêzere, J.L. (2002). Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 2, 1/2, p.73-82.