

**MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN DE ALTA RESOLUCIÓN
Y RIESGOS DE INUNDACIÓN COSTERA**



Autor:

Raúl Ferreiro Pampín

Tutor:

Ramón Blanco Chao

Grado en Geografía y O.T. (2ª Ed.)
Curso académico 2022/2023

ÍNDICE:

1- RESUMEN Y PALABRAS CLAVE	2
2- INTRODUCCIÓN	3
3- ÁREA DE ESTUDIO	6
3.1- CORRUBEDO	7
3.1.1- Geología	7
3.1.2- Oleaje	8
3.2- SAN FRANCISCO - LOURO	9
3.2.1- Geología	10
3.2.2- Oleaje	11
3.3- ÉZARO / PINDO	12
3.3.1- Geología	13
3.3.2- Oleaje	14
4- METODOLOGÍA	15
4.1- GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO	15
4.2- MODELIZACIÓN DEL RUN-UP	17
4.3- OBTENCIÓN DE LA CARTOGRAFÍA FINAL	25
5. RESULTADOS	26
5.1 Corrubedo	26
5.2 San Francisco	27
5.3 Ézaro	28
5.4 O Pindo	29
6. DISCUSIÓN	31
7. CONCLUSIONES	34
8. BIBLIOGRAFÍA	36

1- RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

Abstract:

In the important context of climate change in recent years and its possible effects, forecasting flood hazards in coastal areas becomes more important. The present work tries to apply high-resolution digital elevation models from available LiDAR models, in order to compare them with the existing cartography of MITECO. The results obtained from this study allow a greater adjustment of the hazards of coastal flooding compared to the MITECO models, which often result in under or oversized values.

Key words: Elevation models, LiDAR, Hazards, Coastal flooding.

Resumo:

Co importante escenario do cambio climático nos últimos anos e os seus posibles efectos, adquire unha maior importancia a previsión dos riscos de inundación en zonas costeiras. O presente traballo trata de aplicar modelos dixitais de elevación de alta resolución a partir de datos LiDAR dispoñibles, para poder comparalos coa cartografía existente do MITECO. Os resultados obtidos neste estudo permiten un maior axuste dos riscos de inundación costeira fronte ós modelos do MITECO, que en moitas ocasións resultan en valores infra ou sobredimensionados.

Palabras chave: Modelos de elevacións, LiDAR, Riscos, Inundación costeira.

Resumen:

Con el importante escenario del cambio climático en los últimos años y sus posibles efectos, cobra una mayor importancia la previsión de riesgos de inundación en zonas costeras. El presente trabajo trata de aplicar modelos digitales de elevación de alta resolución a partir de modelos LiDAR disponibles, para poder compararlos con la cartografía existente del MITECO. Los resultados obtenidos de este estudio permiten un mayor ajuste de los riesgos de inundación costera frente a los modelos del MITECO, que en muchas ocasiones resultan en valores infra o sobredimensionados.

Palabras clave: Modelos de elevación, LiDAR, Riesgos, Inundación costera.

2- INTRODUCCIÓN

Un MDT (Modelo Digital del Terreno) se define como una estructura numérica de datos donde se representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Tienen una gran importancia a la hora de realizar estudios en diversos campos como la climatología, la cartografía, la gestión de recursos naturales, la planificación territorial, etc.

Los MDT tienen su origen en Estados Unidos, Massachusetts, de la mano de los científicos Miller y Laflamme (1958). Gracias al trabajo en laboratorio, se establecieron los primeros principios de usos de los modelos digitales, en este caso, para fines militares, tecnológicos y científicos. Los SIG (Sistemas de Información Geográfica) permiten desde hace tiempo una mayor facilidad para tratar y manejar de forma cómoda y eficaz dichos modelos.

Con el paso de los años y los avances de la tecnología de captura de datos, la resolución espacial de estos modelos digitales abarcando grandes superficies

ha ido aumentando, hasta lograr altas resoluciones a día de hoy. Recientemente, la generalización de tecnologías LiDAR (*Light Detection And Ranging*) ha sido clave para lograr datos de partida cubriendo de forma sistemática grandes superficies del terreno con una muy alta resolución espacial.

El LiDAR se trata de una herramienta, compuesta por un escáner láser, que mide la distancia entre el punto de emisión del láser hasta el punto u objeto de la superficie donde rebota. Para obtener esta medida, el LiDAR mide el tiempo que pasa entre que el láser sale del punto de emisión, hasta que vuelve rebotado. El resultado obtenido es una nube de millones de puntos con coordenadas x, y, z de una superficie. La densidad de pulsos registrados, usualmente expresado en pulsos/m², determina la resolución espacial del MDT resultante. Si bien existen otros métodos de construcción de MDT's, como las redes TIN (*Triangulated Irregular Network*), en la mayor parte de las aplicaciones se utilizan preferentemente modelos raster, en los que la resolución espacial se expresa en función del tamaño del píxel en unidades métricas, habitualmente metros o centímetros. La densidad de la nube de puntos condiciona por lo tanto el tamaño del píxel alcanzable, y siempre que éste sea superior o igual a la densidad de puntos, implica un proceso de interpolación, que a su vez, genera resultados diferentes.

Antiguamente, los datos LiDAR se almacenaban en archivos ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), aunque actualmente, se utilizan los archivos LAS, debido al enorme tamaño de los conjuntos de datos LiDAR y a su formato binario que permite almacenar grandes datos de forma eficaz. A partir de estos datos *.las, y utilizando programas SIG, se pueden crear modelos digitales de elevación con muy alta resolución.

Las aplicaciones en costa de los MDT son muy variadas pero una de las más destacables se orienta a la modelización de procesos y prevención de riesgos,

como el ascenso del nivel del mar o los efectos de eventos extremos. En los análisis de costa, por tanto, uno de los principales parámetros es la correcta definición del datum vertical sobre el que se modela, por ejemplo el nivel medio del mar, cotas de marea alta, etc. La precisión obtenida en la adquisición de los datos determina la resolución vertical del modelo, y por tanto, del datum vertical utilizado (Eakins y Grothe, 2014).

La Directiva 2007/60 del Parlamento Europeo relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación buscaba desarrollar nuevas herramientas para evaluar y reducir los riesgos y consecuencias de las inundaciones. El Ministerio de Medio Ambiente en España, es quien se encarga de implementar esta directiva, en base al Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación a través de tres etapas:

- Una evaluación preliminar de los riesgos de inundación, llevada a cabo por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- Elaboración de mapas de peligro y riesgo por inundación, ejecutada por el Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (IHC) que se incorporan al Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables¹.
- Creación de planes de gestión para aquellas áreas identificadas.

En España, la evaluación preliminar del riesgo de inundación fue realizada por el Centro de Estudios Hidrográficos (Tomás et al. 2016).

Los objetivos que se persiguen con el siguiente trabajo son:

- Probar modelos de inundación por oleaje mediante datos accesibles de alta resolución.
- Generar modelos de elevaciones de alta resolución en sectores costeros a partir de datos LiDAR disponibles.

- Efectuar cálculos de máximo alcance del oleaje (run-up) como parámetro para determinar los riesgos de inundación costera.
- Comparar la cartografía obtenida con la cartografía de Peligrosidad de Inundación costera elaborada en el marco del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

3- ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se divide en cuatro ubicaciones diferentes de la costa occidental, provincia de A Coruña. Con la intención de cotejar la validez del modelo, se seleccionaron localidades con diferentes orientaciones y grados de exposición al oleaje. En tres de ellos, Ézaro, O Pindo y Corrubedo, existen cartografías de inundación del SNCZI, mientras que en la cuarta, San Francisco, en la margen norte de la Ría de Muros y Noia no se dispone de ella (Fig. 1).

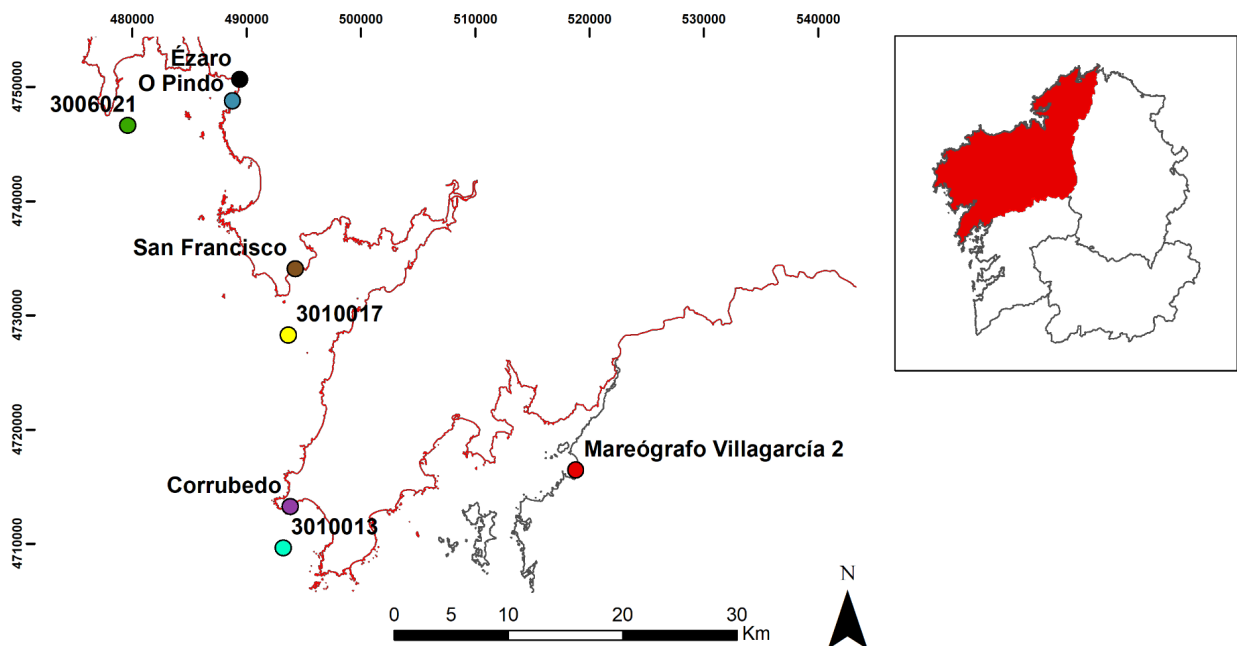


Fig.1: Mapa con las localizaciones de todos los sectores de estudio.

3.1- CORRUBEDO

La primera de las localizaciones donde se realiza el trabajo, es Corrubedo, parroquia perteneciente al municipio de Ribeira. La localidad se sitúa en un tramo de costa orientado al SE, al norte de la ensenada en la que se ubica el complejo dunar de Corrubedo y al este de Punta Praxeo, un saliente que conforma un abrigo frente al oleaje del NO y O.

Coordenadas ETRS89 UTM 29N: X: 493832,6 Y: 4713326,4

3.1.1- Geología

La zona de Corrubedo está compuesta principalmente por granitos de dos micas de grano medio y grueso con megacristales (Galán Arias et al. 1979). La localidad se emplaza al norte del Complejo Dunar de Corrubedo y Lagunas de Carregal y Vixán, un extenso complejo compuesto por sistemas dunares y de marismas de Carregal y la laguna de agua dulce de Vixan. La ensenada se cierra al norte por una costa generalmente baja, compuesta por acantilados de escasa altura que no superan los 10 metros de altura, y con una pendiente suave hacia el interior, desde Cabo Corrubedo hasta Punta Praxeo (Fig. 2).

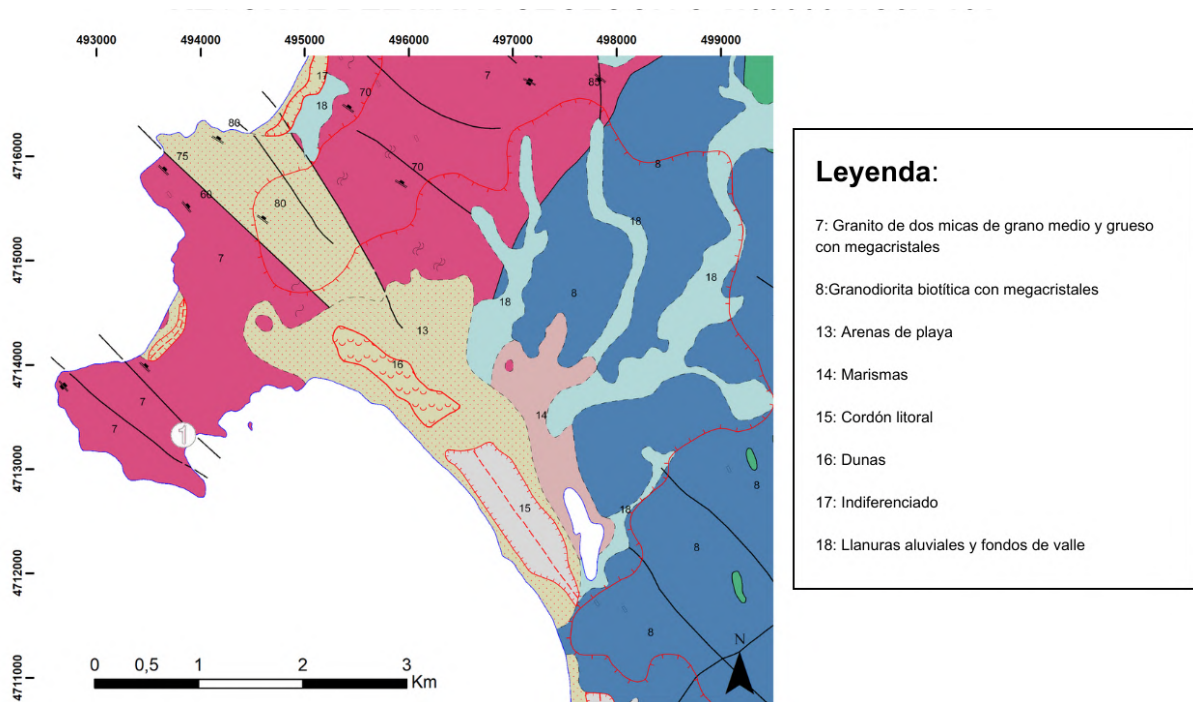


Fig. 2: Recorte del mapa geológico de la hoja nº 151.

3.1.2- Oleaje

De acuerdo con el punto SIMAR 3010013, la componente principal del oleaje es oeste y oeste-noroeste (Fig. 3) , aunque también se registran procedencias en menor medida del noroeste y suroeste. Las olas con mayor altura significativa, llegando a superar los 5 metros, provienen de una componente oeste.

Según las tablas de oleaje, la altura de ola significativa más frecuente es la de 1 metro, representando casi un 30%. La altura de 1,5 metros llega a representar un 20%, mientras que las siguientes, de 0,5 y 2 metros, se sitúan cerca del 15% de frecuencia. El periodo de pico más frecuente es el de 10 y 12 segundos, representando ambas, una frecuencia aproximada del 30%.

En la estación de invierno, los periodos de pico de 12 y 14 segundos, llegan a conformar casi el 70% de la frecuencia de periodos. Las alturas de ola son más

diversas, aunque las alturas de 1,5 y 2 metros llegan a suponer un 30%. También aparece con gran porcentaje la altura de 2,5 metros, con un 14%. En verano, el periodo de pico de 10 segundos, representa casi un 50%, y la altura de ola significativa más frecuente, es la de 1 metro, con un 45%, seguida de la de 0,5 metros, con un 25%.

El viento procede en su gran mayoría del norte y nor noreste (Fig. 3), y del sur y sur suroeste. Los vientos con componente este y oeste son muy escasos, especialmente los del este, que vienen con muy poca fuerza. Las rachas de viento más fuertes proceden de la componente sur y sur suroeste, alcanzando velocidades de más de 10 m/s.

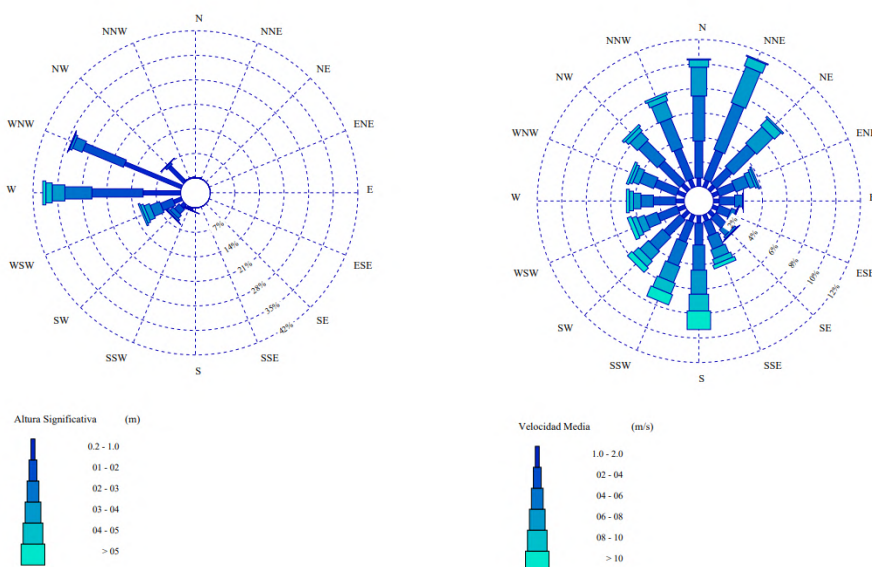


Fig. 3: Rosa de oleaje y de vientos del punto SIMAR 3010013.

3.2- SAN FRANCISCO - LOURO

La playa de San Francisco se ubica en la parroquia de Louro, municipio de Muros. Esta localidad se ubica en un tramo de costa con una orientación hacia el SE, situada sobre la Ensenada de San Francisco. Al SO, un saliente

conformado por Punta Carreiro y Punta Queixal, donde se localiza Monte Louro, sirve de abrigo a la ensenada de San Francisco, protegiéndola de la acción directa del oleaje.

Coordenadas ETRS89 UTM 29N: X: 493963,2 Y: 4734049,1

3.2.1- Geología

Sobre la zona de San Francisco, predominan los granitos de dos micas de grano medio a grueso con orientación por deformación tipo Barbanza, y granitos de dos micas de grano fino a medio tipo Muros (Divar Rodríguez et al. 1979). También existen afloramientos de esquistos con algunos niveles de cuarcita y rasas litorales. Según Capdevila y Floor (1970), estas series de granito de dos micas que son comunes en todo el occidente de Galicia, suponen sobre un 35% de los afloramientos. Se encuentran generalmente orientados y deformados en muchas partes (Fig. 4).

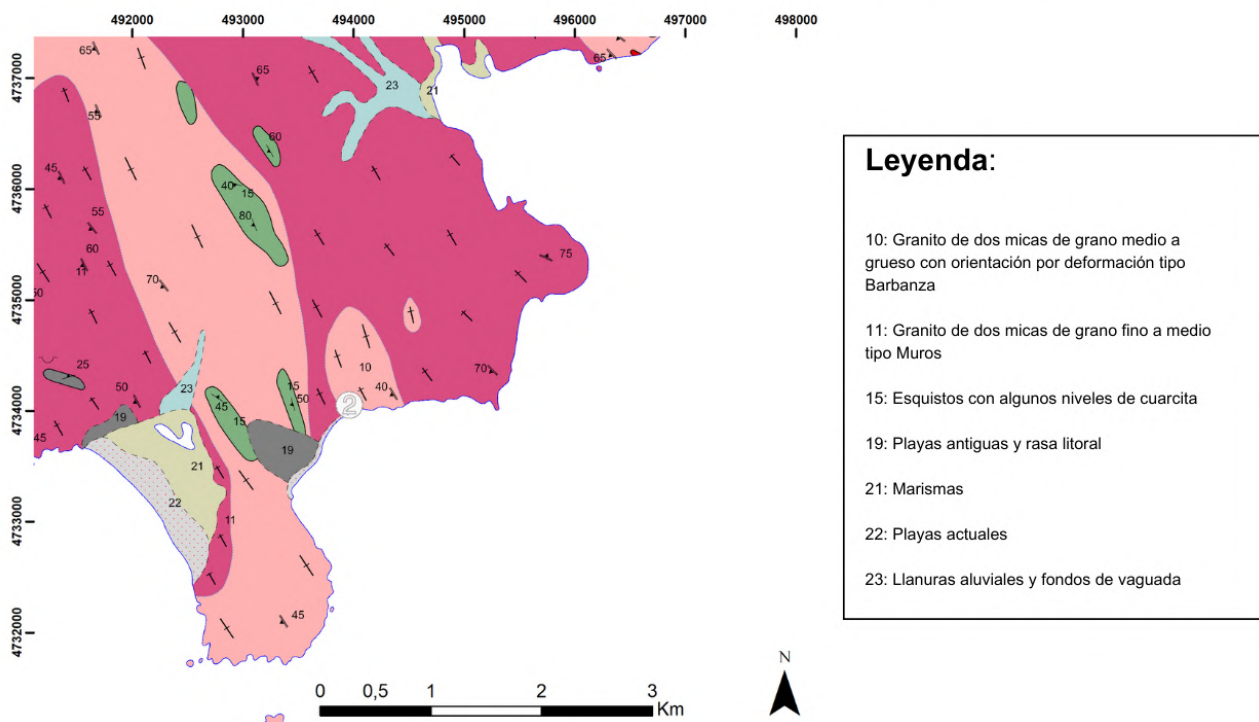


Fig. 4: Recorte del mapa geológico de la hoja nº 119.

3.2.2- Oleaje

Según los datos del punto SIMAR 3010017, más del 50% del oleaje procede de una componente oeste, mientras que se registran también algunas procedencias del oeste-noroeste y oeste-suroeste en menor porcentaje (Fig. 5). Las alturas significativas del oleaje no alcanzan gran altura, al contrario que se producía en Corrubedo.

Según las tablas de oleaje del punto SIMAR, casi un 60% de frecuencia corresponde a un periodo de pico de entre 10 y 12 segundos. Por parte de la altura significativa, casi un 30% del oleaje tiene una altura significativa de 1m, y las olas de 0,5 y 1,5 metros, rondan el 20%.

En invierno, los periodos de pico de 12 y 14 segundos representan un 65% de la frecuencia total, y la altura significativa de ola más frecuente es la de 1,5 metros (20%) y la de 2 metros (17%). En la estación de verano, domina el periodo de pico de 10 segundos, con casi un 50%, y en las alturas de ola, las alturas de 0,5 y 1 metro suponen en conjunto un 80% de frecuencia.

Los vientos son mayoritariamente procedentes del norte-noreste, noreste (Fig. 5), y del sur y suroeste. En este caso, al igual que en Corrubedo, las rachas de vientos más fuertes, que superan los 10 m/s, son procedentes del sur.

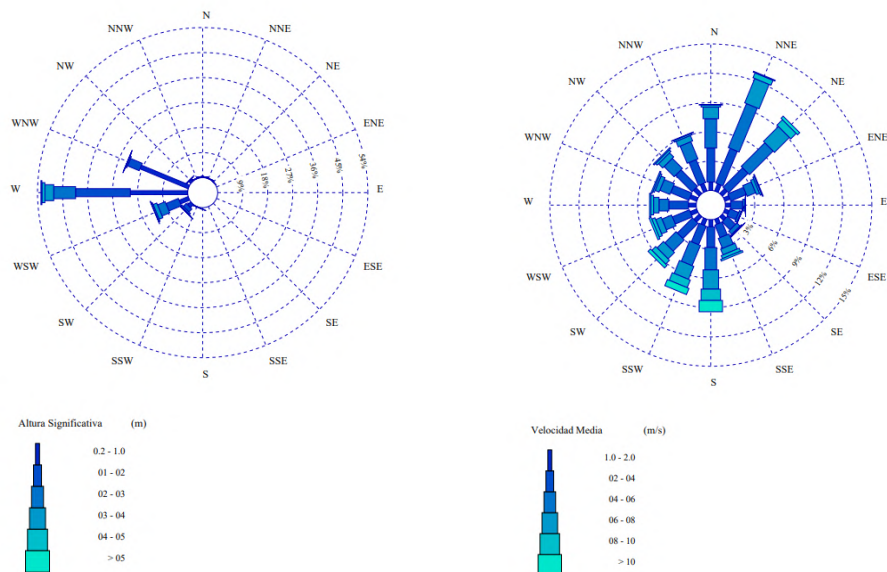


Fig. 5: Rosa de oleaje y de vientos del punto SIMAR 3010017.

3.3- ÉZARO / PINDO

La playa de Ézaro se ubica en la parroquia de Ézaro, municipio de Dumbría. La localidad se sitúa a lo largo de todo el tramo costero, orientado al suroeste y sobre la Ensenada do Ézaro, entre Punta Finsín y Punta Chamadoiro. Al contrario que Corrubedo y San Francisco, en Ézaro no existen salientes ni otras formaciones que abriguen la ensenada y la playa, por lo que recibe la acción directa del oleaje.

Coordenadas ETRS89 UTM Zone 29N: X: 489637,6 Y: 4750511

La playa de O Pindo tiene su ubicación en la parroquia de O Pindo, municipio de Carnota. La localidad se ubica al oeste y suroeste de la Playa de San Pedro, orientada hacia el suroeste. Como sucede en Ézaro, y debido a su orientación, sobre ésta playa recae la acción directa del oleaje.

Coordenadas ETRS89 UTM Zone 29N: X: 488838,7 Y: 4748768,7

3.3.1- Geología

Sobre Pindo, predomina la granodiorita biotítica tipo Pando, y facies de borde tipo Pindo (Fig. 6). A su alrededor también aparecen rasas litorales, tanto al norte como al sur. En Ézaro, predomina también esta granodiorita biotítica, pero aparecen muchos más afloramientos al norte y al oeste, como llanuras aluviales y fondos de vaguada, granitoide migmatítico con abundantes restitos y zonas graníticas homogéneas, esquistos con algunos niveles de cuarcita y por último, afloramientos de granitos de dosa micas de grano medio a grueso con orientación por deformación de tipo Barbanza y Dumbría, con una disposición noroeste sureste (Divar Rodríguez J. e Iglesias Ponce de León M., 1979).

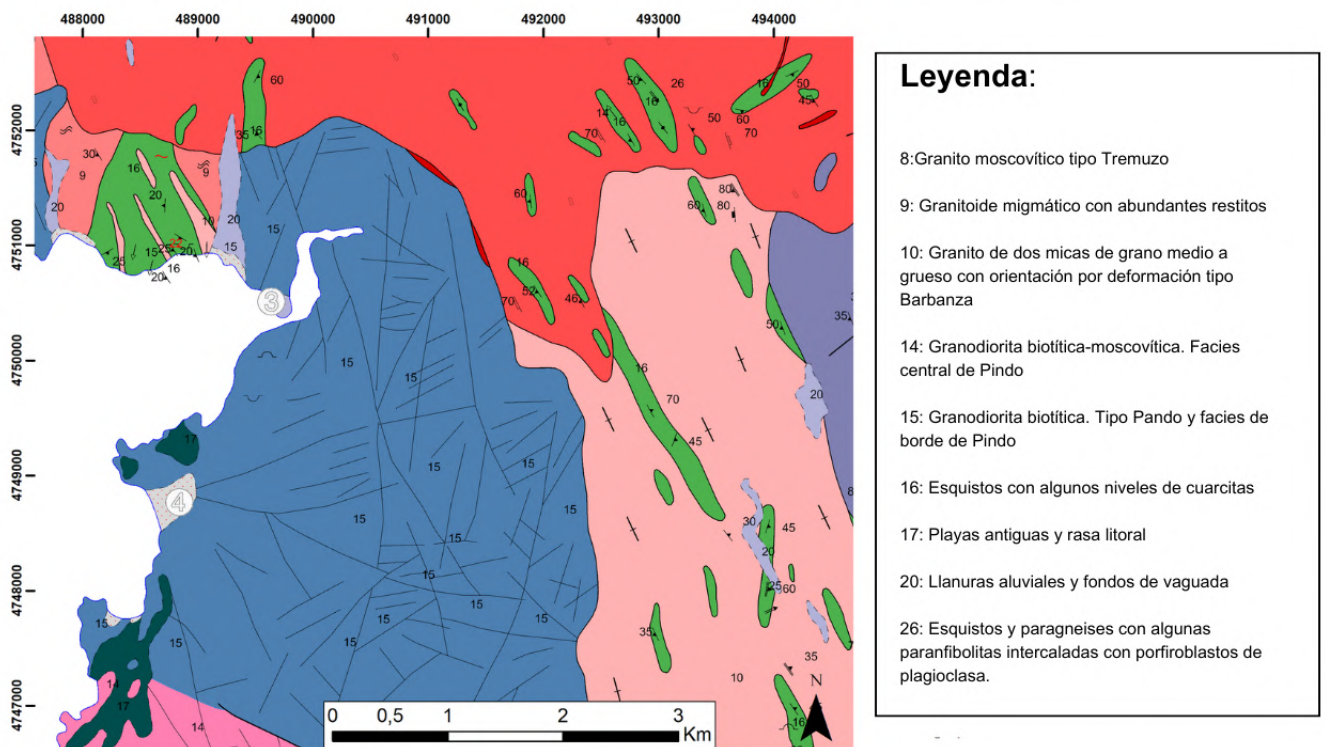


Fig. 6: Recorte del mapa geológico de la hoja nº 93.

3.3.2- Oleaje

Siguiendo los datos del punto SIMAR 3006021, en Pindo y Ézaro la componente principal del oleaje es oeste y oeste noroeste, aunque pueden llegar a proceder también del norte-noroeste, y del sur-suroeste. El oleaje con mayor altura significativa procede del oeste y del oeste-suroeste, llegando a superar los 5 metros de altura (Fig. 7).

Analizando los datos anuales, en la frecuencia de altura de ola significativa asociada a este punto SIMAR, domina la altura de 1 metro, superando un 25%, seguida por la de 1,5 metros, que llega hasta el 20%. En el periodo de pico, domina el de 10 y 12 segundos, representando ambos un 30% cada una.

En invierno, los periodos de pico más frecuentes se sitúan entre los 12 y 14 segundos, sumando más del 65% entre ambos. La altura significativa se reparte de forma más regular, aunque dominan las alturas de 1,5 y 2 metros, con una frecuencia del 15% cada una. Aparecen también alturas de 2,5 y 3 metros, superando las frecuencias del 10%. Por el contrario, en verano, el periodo más frecuente es el de 10 segundos, llegando a alcanzar casi una frecuencia del 50%. Las mayores frecuencias de altura de ola significativa de esta estación, son las de 0,5 y 1 metro, sumando entre ambas casi un 70%.

La procedencia del viento es principalmente del norte-noreste (Fig. 7), y en menores porcentajes, procede también del norte, noreste, sur y sur-suroeste. Las rachas de viento más fuertes, que superan los 10 m/s, proceden del sur y sur-suroeste, aunque a diferencia del resto de zonas comentadas anteriormente, también aparecen valores que superan los 10 m/s en la componente norte-noreste.

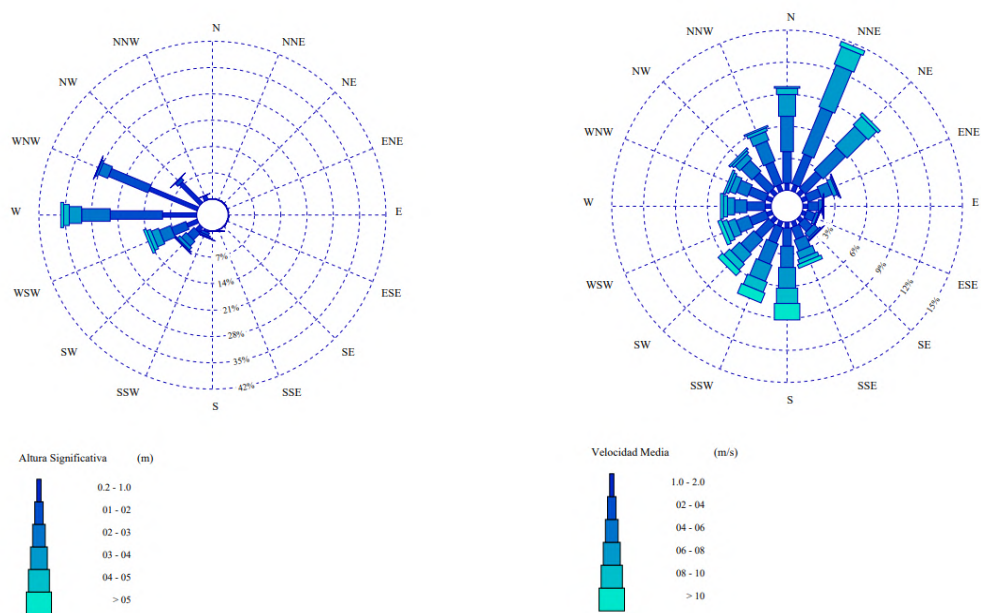


Fig. 7: Rosa de oleaje y vientos del punto SIMAR 3006021.

4- METODOLOGÍA

4.1- GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

Para generar los MDT necesarios se utilizaron los archivos de nubes de puntos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional. Inicialmente se utilizaron las dos coberturas disponibles, que para la provincia de A Coruña corresponden a los años 2010 y 2015.

De acuerdo con las prescripciones técnicas, las nubes de puntos disponibles garantizan una cobertura mínima de 0.5 pulsos/m², con un error máximo en la elevación de ± 0.4 m (IGN, 2015). Las nubes de puntos se encuentran clasificadas de acuerdo a los criterios de la *American Society for Photogrammetry & Remote Sensing* (Tabla 1).

Valor de clasificación	Significado
0	Creado, Nunca clasificado
1	Sin clasificar
2	Terreno, Suelo
3	Vegetación baja
4	Vegetación media
5	Vegetación alta
6	Construcciones
7	Ruido
8	Puntos clave del modelo. Puntos de masa
9	Agua
10	Reservado para la definición de ASPRS
11	Reservado para la definición de ASPRS
12	Superposición de puntos
13 - 31	Reservado para la definición de ASPRS

Tabla 1: Códigos de clasificación de las ASPRS.

Los archivos están disponibles en formato comprimido *.laz, por lo que deben convertirse al formato estándar *.las. Para ello se utilizó el ejecutable *laszip* dentro de las herramientas *LasTools* (<https://rapidlasso.de/laszip/>).

Una vez están convertidos los archivos en formato *.las, se utilizó el programa SAGA-GIS con el objeto de verificar la existencia de pulsos erróneos y depurarlos en su caso. Las nubes de puntos se fusionan en un solo archivo y se verificó que las elevaciones máximas eran correctas, para descartar la presencia de pulsos erróneos. Solamente se detectaron pulsos con elevaciones erróneas en los casos de San Francisco y Corrubedo, en los que los valores máximos triplican la altitud máxima que corresponde. Para eliminar estos puntos que alterarían el resultado, se emplea la herramienta “*Subset Extractor*” en el programa SAGA, para establecer el número máximo y mínimo de valores que se desea. De ahí la importancia de comprobar en el mapa

topográfico cuáles son estos valores. El resultado es un *Las Dataset* que estará preparado para procesar en el programa ArcGIS.

Una vez verificado la ausencia de puntos con elevaciones erróneas, se elaboraron los MDT mediante el programa ArcMap. El procedimiento en ArcMap se inicia con la agrupación de los archivos *.las en el denominado *Las Dataset*, que permite la visualización y aplicación de filtros a las nubes de puntos. Para generar Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) se seleccionan solamente los pulsos identificados como código 2, correspondientes a "suelo". La conversión a un archivo raster se realiza de forma directa mediante la herramienta "*Las Dataset to Raster*", donde se establece el método de agrupamiento o *binning* estableciendo la asignación de valores a la celda el mínimo. Como método de interpolación para los píxeles que no contengan puntos se utilizó el del Vecino Natural. Se establece una resolución del raster de salida de un tamaño de píxel de 0.5 m.

Para los Modelos Digitales de Superficie (MDS), el proceso es similar al descrito anteriormente, pero cambiando algunos parámetros. Los puntos deben ser clasificados como "All" previamente, ya que en este modelo se utilizan todos los puntos, incluyendo edificios, vegetación, etc. Con la herramienta "*Las Dataset to Raster*", se escoge de nuevo el método de agrupamiento o *binning*, se establece un valor promedio para la asignación de valores a la celda (*average*), y como método de interpolación para los píxeles sin puntos, de nuevo el Vecino Natural. El modelo final obtenido cuenta con una resolución del píxel de 0,25 x 0,25 metros.

4.2- MODELIZACIÓN DEL RUN-UP

Se denomina "*Run-up*" según el MITECO, a "*la propagación de la ola sobre el nivel del mar hacia la costa, produciendo un movimiento de ascenso de la*

masa del agua a lo largo del perfil de la playa“. De forma más precisa, es el resultado de los fenómenos denominados “*wave set-up*”, la elevación del nivel de propagación de la ola causado por la rompiente, y del ascenso de la ola hasta una cota máxima (*swash*) donde se detiene para descender por gravedad (Masselink y Hughes, 2003) (Fig. 8).

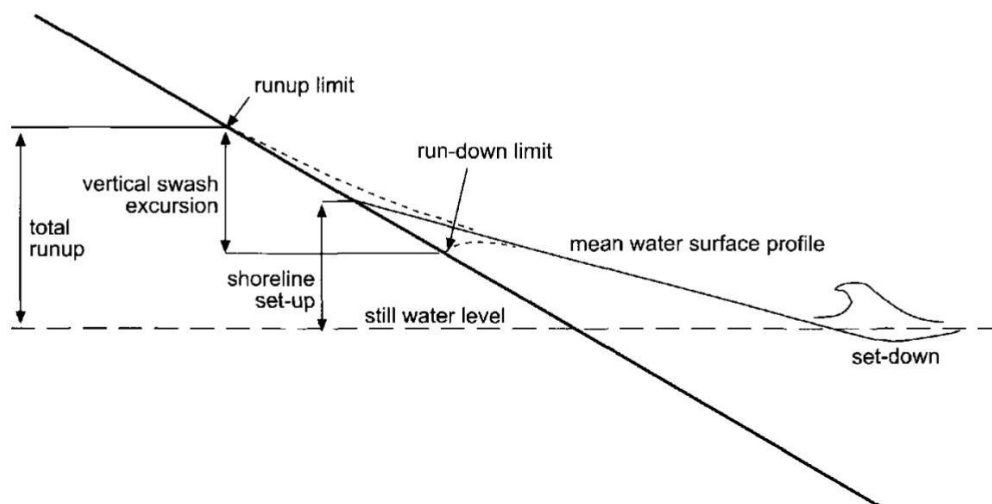


Fig. 8: Esquema del proceso de *run-up* (Masselink y Hughes, 2003).

Para obtener el cálculo del máximo alcance del oleaje se aplicó la ecuación de Komar (1998), una fórmula sencilla en la que los parámetros son fácilmente obtenibles:

$$R_{2\%} = 0.36g^{1/2} \tan\beta H_p^{1/2} T$$

Donde $R_{2\%}$ es el run-up causado por una altura de ola que sólo es superada por el 2% del oleaje, es decir, una altura de ola asociada al percentil 98, g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²), $\tan\beta$ es la pendiente de la playa, H_p es la altura significativa en aguas profundas y T el periodo asociado (en segundos).

Para obtener las alturas de ola significativa (H_s) con los que se van a ejecutar los modelos, es necesario descargar las series de datos históricos de oleaje. Estos datos descargados de la web de Puertos del Estado, contienen valores

históricos de oleaje entre 1958 y 2022. Para cada zona (Fig. 9) se descargan datos de diferentes puntos SIMAR (Tabla 2). Por último, los datos de niveles de marea, sobre la que se propaga la ola, se descargan del mareógrafo de Villagarcía 2.

ZONA	Nº PUNTO SIMAR
CORRUBEDO	3010013
SAN FRANCISCO	3010017
ÉZARO/PINDO	3006021

Tabla 2: Punto SIMAR asociado a cada zona.

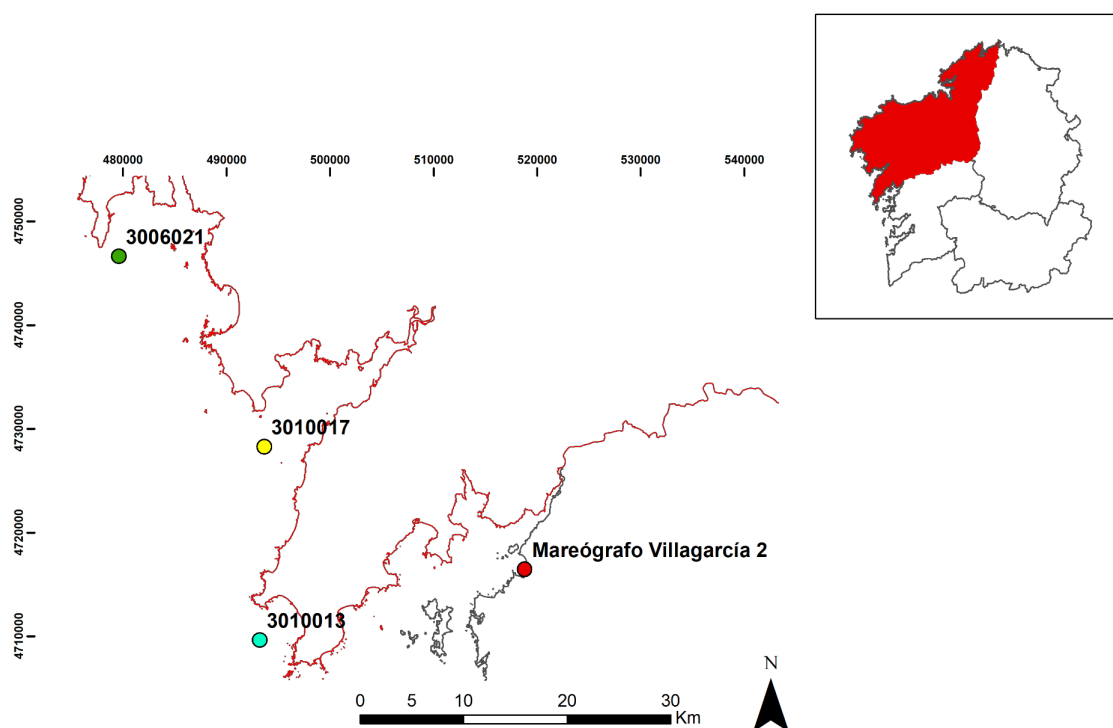


Fig. 9: Mapa con la ubicación de puntos SIMAR y Mareógrafos utilizados.

Para cada serie de datos, se calculó la altura de ola significativa correspondiente al percentil 98%, y se determinó el periodo medio asociado (Tabla 3). No obstante, los puntos SIMAR se sitúan en posiciones de mar abierto en comparación con las de las localidades analizadas. Con el fin de obtener una aproximación más realista a la altura de ola en las zonas de

estudio, se aplica una reducción de la altura de ola, en base a los modelos de propagación del Atlas de Ondas de Meteogalicia (2014) (Fig. 10).

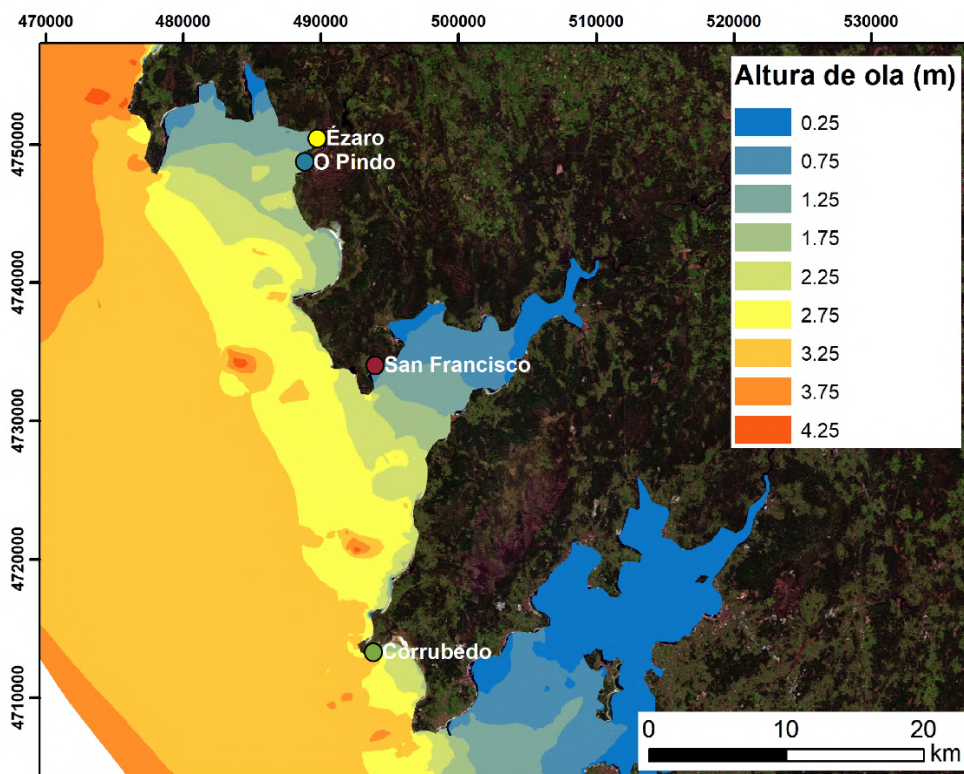


Fig. 10: Modelo de propagación y atenuación del oleaje. Datos del Atlas de Ondas de Galicia (2014).

Zona	Hs (m)	% reducción	Hs reducida (m)	Tp asociado (m)
Corrubedo	4.74	53	2.5	15.87
San Francisco	4.01	23	1	10.29
Ézaro	4.83	75	1.3	13.93
Pindo	4.83	41	3.1	13.93

Tabla 3: Altura significativa (Hs) y periodo de pico asociado (Tp) asociados a cada zona de estudio.

Un parámetro esencial en el cálculo del *run-up*, pero el más difícil de obtener, es la pendiente de la playa, que para este trabajo, se derivó de los propios MDT elaborados. De las dos fechas de vuelo utilizadas, se optó por extraer los valores de pendiente de los MDT de 2015, ya que a diferencia del de 2010, en

todos los casos el vuelo se realizó en condiciones de marea baja y por tanto con una mayor superficie de playa expuesta. De acuerdo a la configuración de exposición de cada tramo se trazaron entre 1 y 4 perfiles (Fig. 11-14).

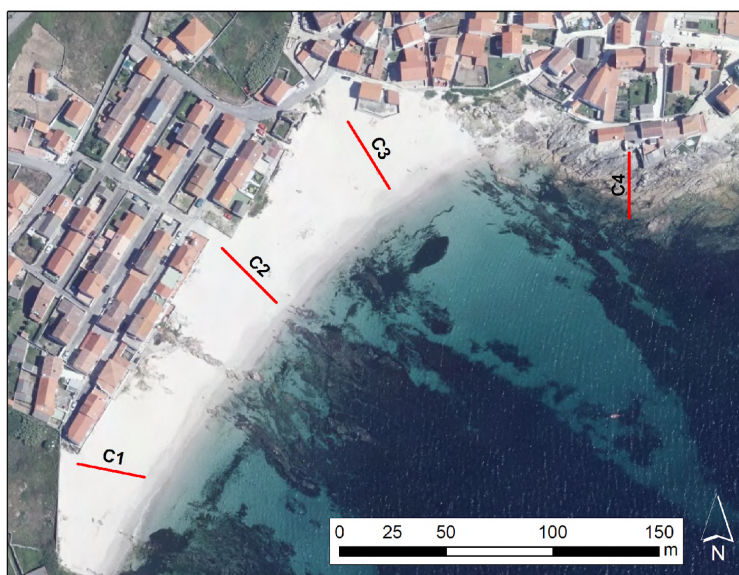


Fig. 11: Perfiles realizados sobre Corrubedo.

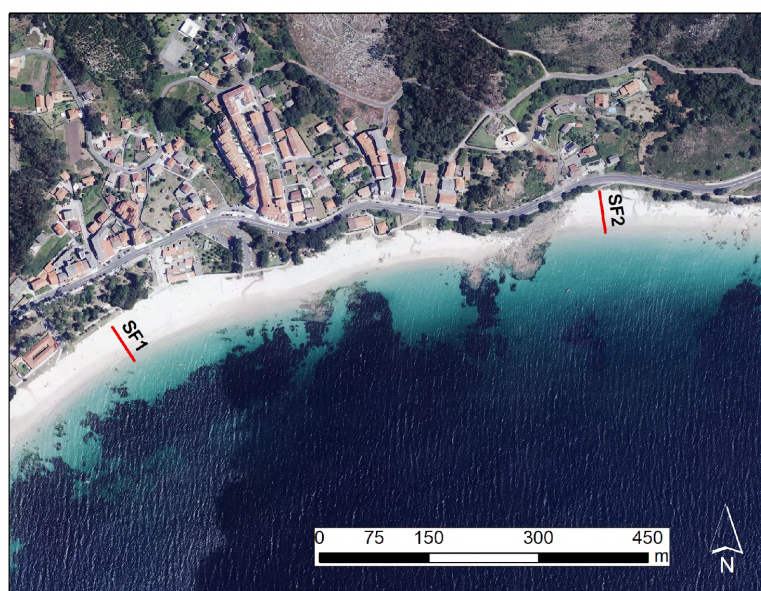


Fig. 12: Perfiles realizados sobre San Francisco.

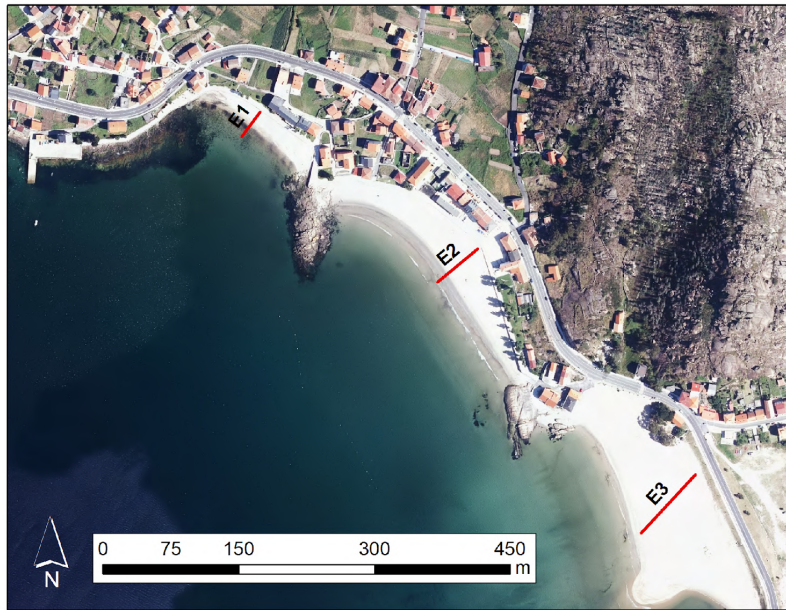


Fig. 13: Perfiles realizados sobre Ézaro.



Fig. 14: Perfiles realizados sobre O Pindo.

Las pendientes son obtenidas con ArcGIS, con la herramienta 3D Analyst, interpolando una línea sobre las playas, almacenándose el resultado como un archivo *.dbf.

No obstante, la alta resolución de los Modelos Digitales de Superficie, hace que muchos perfiles salgan escalonados. Por ello, sobre el perfil generado, se ha escogido un tramo en concreto con la pendiente que se ha considerado apropiada. Este problema se ha presentado principalmente en O Pindo, donde la zona de marisma ha presentado perfiles muy escalonados y con altibajos.

Los datos de cada perfil han sido extraídos para trabajar en hojas de cálculo. Una vez extraídos y depurados estos datos del perfil a Excel, se ha podido establecer un determinado desnivel y distancia para cada tramo. La tangente necesaria para la ecuación de Komar se obtiene a partir de una división entre el desnivel y la distancia.

Esta ecuación es especialmente sensible al parámetro de la pendiente de la playa, de ahí la importancia de intentar obtener una pendiente con la mayor exactitud posible. En el caso de Ézaro, el perfil obtenido en la fecha de vuelo del LiDAR es de verano, pero las condiciones en las que se modela, corresponden a situaciones de invierno-otoño, con un perfil más disipativo. Para esto, se reduce el desnivel para ajustarlo más a un perfil de invierno.

Una vez obtenidos los valores de *run-up*, se sumaron al nivel de propagación para obtener la cota máxima de alcance del oleaje, para lo que se utilizaron los datos del mareógrafo más cercano, en este caso Villagarcía 2. Los datos del mareógrafo están referidos al cero del puerto o cero REDMAR, por lo que deben ser transformados a elevaciones sobre el Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA) (Tabla 4).

Nivel	Datos mareógrafo (m)	Diferencia NMMA (m)	Altura (m)
Máximo nivel observado	4.63	1.893	2.737
Máxima pleamar astronómica (PMMA)	4.32	1.893	2.427
Pleamar viva media observada (PNVM)	3.95	1.893	2.057

Tabla 4: Cotas y transformación al NMMA.

Para este estudio, el nivel que se ha escogido, es el de la máxima marea observada, por lo que a cada valor de elevación de *run-up* se le suma la cota de máximo nivel observado, llegando al siguiente resultado (Tabla 5):

Zona	Perfil	Run-up (m)	Cotas de alcance del oleaje (m)
Corrubedo	C1	1.75	4.48
Corrubedo	C2	1.66	4.39
Corrubedo	C3	3.33	6.07
Corrubedo	C4	3.8	6.53
San Francisco	SF1	1.8	4.54
San Francisco	SF2	0.75	3.47
Ézaro	E1	2.29	5.02
Ézaro	E2	1.33	4.06
Ézaro	E3	1.66	4.40
O Pindo	P1	0.3	3.03

Tabla 5: Cotas finales de alcance del oleaje calculadas.

4.3- OBTENCIÓN DE LA CARTOGRAFÍA FINAL

Una vez obtenidos los modelos digitales y las cotas de alcance del oleaje, el siguiente paso consiste en procesar los datos para obtener la cartografía de zonas inundables de origen marino.

Tras efectuar pruebas con los MDE y MDS, se optó por utilizar el Modelo Digital de Superficie, ya que es el que mejor se adapta a la hora de establecer el alcance del oleaje, ya que al representar la altura de los edificios, estos no aparecen marcados como inundados. El raster correspondiente al MDS, se reclasifica estableciendo 2 clases, una que vaya hasta la cota indicada, y otra que la supere y que se termina desechando.

Seleccionamos este grupo, con el código 1 en la tabla de atributos, y arrastramos la capa al *Toolbox* de conversión de “*raster to polygon*”. Al quedar ya seleccionado el grupo 1, el resultado de la conversión será un archivo vectorial ya separado, con la cota máxima de inundación calculada.

Por último, este archivo vectorial debe ser corregido y depurado, ya que la reclasificación simplemente indica las zonas por debajo de la cota establecida. Para ello, es necesario un trabajo manual de depuración, donde se apliquen criterios de conectividad entre zonas, así como de conocimiento real de las zonas en base a la distribución de construcciones. Con la herramienta de edición de ArcGIS, vamos editando los polígonos de esta cartografía, rellenando huecos que quedan aislados, y cortando polígonos en lugares que no sufren riesgos de inundación.

Poniendo de ejemplo el caso de Ézaro, y tras un proceso en SIG de depuración, el resultado varía como se detalla en la Fig. 15 desde la cartografía inicial, hasta la cartografía final ya depurada.



Fig. 15: Ejemplo del proceso de depuración de la cartografía de Z.I. de Ézaro.

5. RESULTADOS

Una vez obtenidos ambos modelos, el del trabajo personal y el del MITECO, y solapados en el mapa, se pueden diferenciar claramente numerosas diferencias en función de la zona.

5.1 Corrubedo

Al noreste y suroeste de la playa de Corrubedo, existen dos zonas sobrestimadas por parte del MITECO (Fig. 16), cartografiando como zonas inundables construcciones varios metros tierra adentro, especialmente en el noreste, donde la cota de zona inundable supera el acantilado rocoso y se mete pueblo adentro, quedando dentro de esta cartografía varios edificios que en el trabajo realizado, no contemplan. Lo mismo ocurre con la construcción situada en el suroeste, que el MITECO la marca como en riesgo de inundación, y en este trabajo queda fuera.

Por lo contrario, en el norte, donde la playa alcanza mayor anchura, existe una zona infraestimada por parte del MITECO. Mientras que su cartografía sólo llega hasta la mitad de la playa, la del presente trabajo no sólo sobrepasa dicha playa, sino que alcanza carretera adentro, llegando a rodear algunos edificios situados en primera línea de playa.

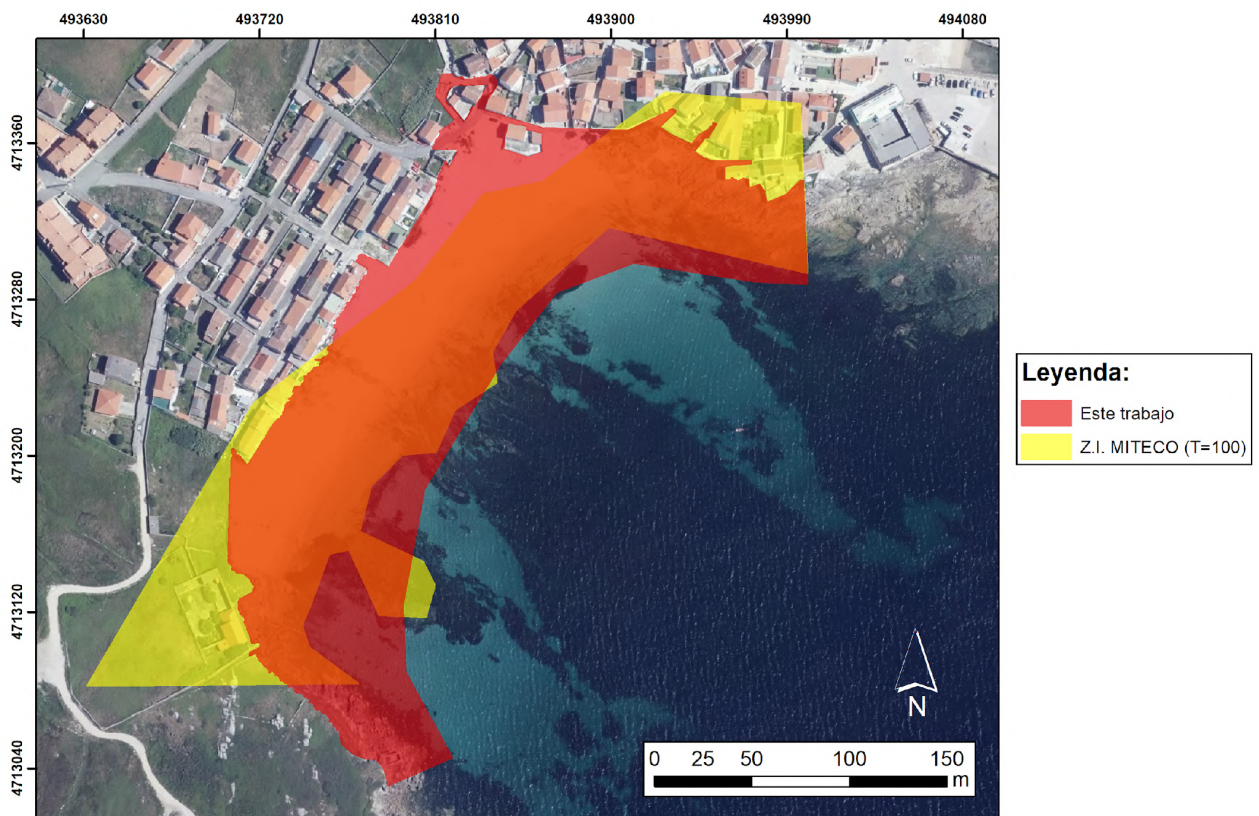


Fig. 16: Comparación en Corrubedo de la cartografía de Z.I del MITECO y este trabajo.

5.2 San Francisco

La playa de San Francisco es la única zona del trabajo que no se puede comparar con la cartografía del MITECO, ya que ésta es inexistente para esta zona, al no incluirse como zona con riesgo de inundación marina. No obstante, se ha elaborado esta cartografía de todas maneras, después de ser cotejada

anteriormente con otras zonas. La zona inundable del trabajo llega a ocupar toda la playa más la costa rocosa del oeste. Cabe destacar, que entre la playa y el paseo y la zona de recreación que justo limitan, existe un muro de por lo menos uno o dos metros, que sirve de barrera para que el oleaje no alcance cotas más altas. Por ese motivo, y por los bajos niveles de *run-up*, no existen construcciones en peligro por inundación en ningún sector (Fig. 17).

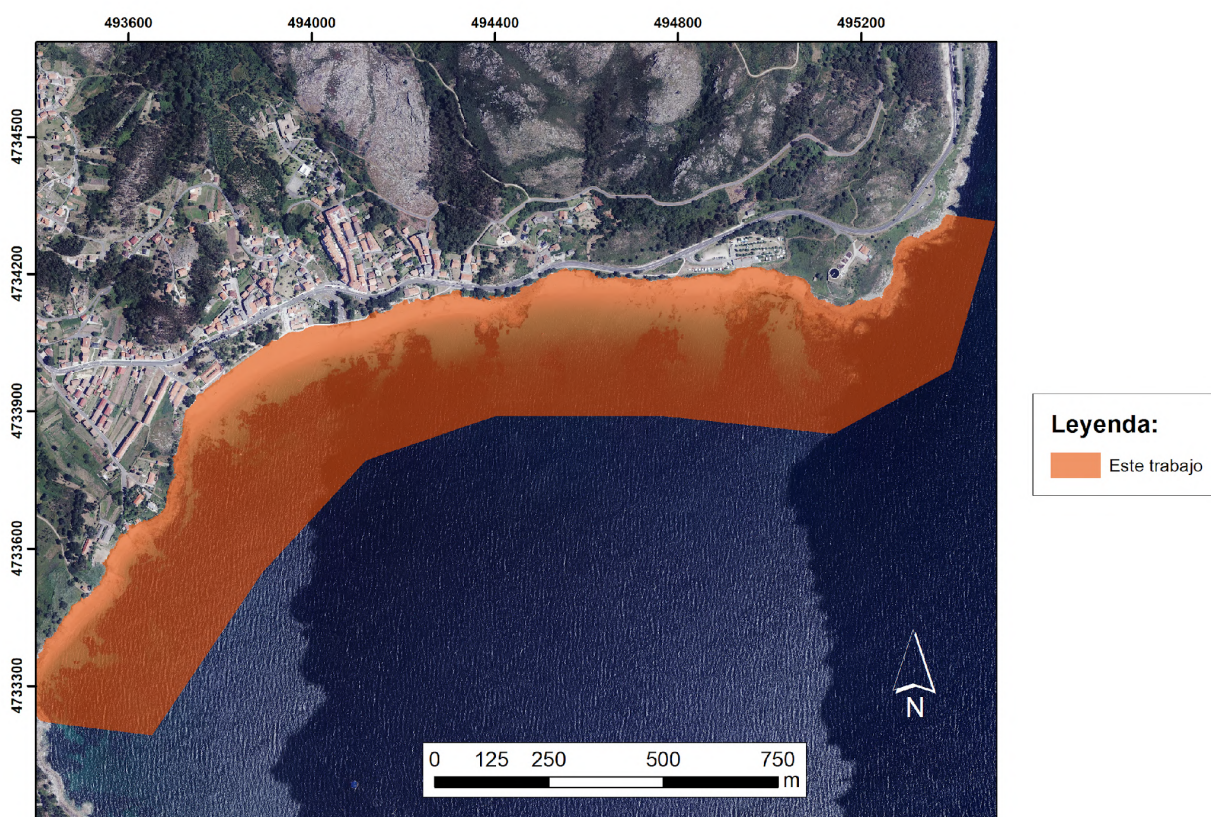


Fig. 17: Comparación en San Francisco de la cartografía de Z.I del MITECO y este trabajo.

5.3 Ézaro

Esta zona es la que más diferencia presenta entre un modelo y otro. Toda la cartografía de la zona inundable del MITECO se encuentra sobrestimada. Se encuentran zonas en riesgo de inundación hasta varios metros pasada la carretera, incluyendo decenas de casas de la localidad de Ézaro, que difícilmente puede producirse por propagación del oleaje. La cartografía de este trabajo (Fig. 18), tiene un alcance de inundación más ajustado, en ningún

caso llegando a pasar la carretera que cruza la localidad en un eje sureste-noroeste. La parte donde se realizó el perfil 1 (E1), es decir, la situada más al norte, es el sector donde la cota de *run-up* es más alta, y por tanto, más lejos llegará la propagación de la ola. Las únicas construcciones que se marcan en riesgo de inundación son las de esta zona, inundando parte del muelle situado al oeste, y varias casas al norte, en primera y segunda línea de playa. El resto de zonas inundables situadas más hacia el sureste, no llegan a alcanzar edificios ni otros elementos antrópicos, pero sí cubren la playa en su totalidad, marcando su límite con el inicio de la carretera.

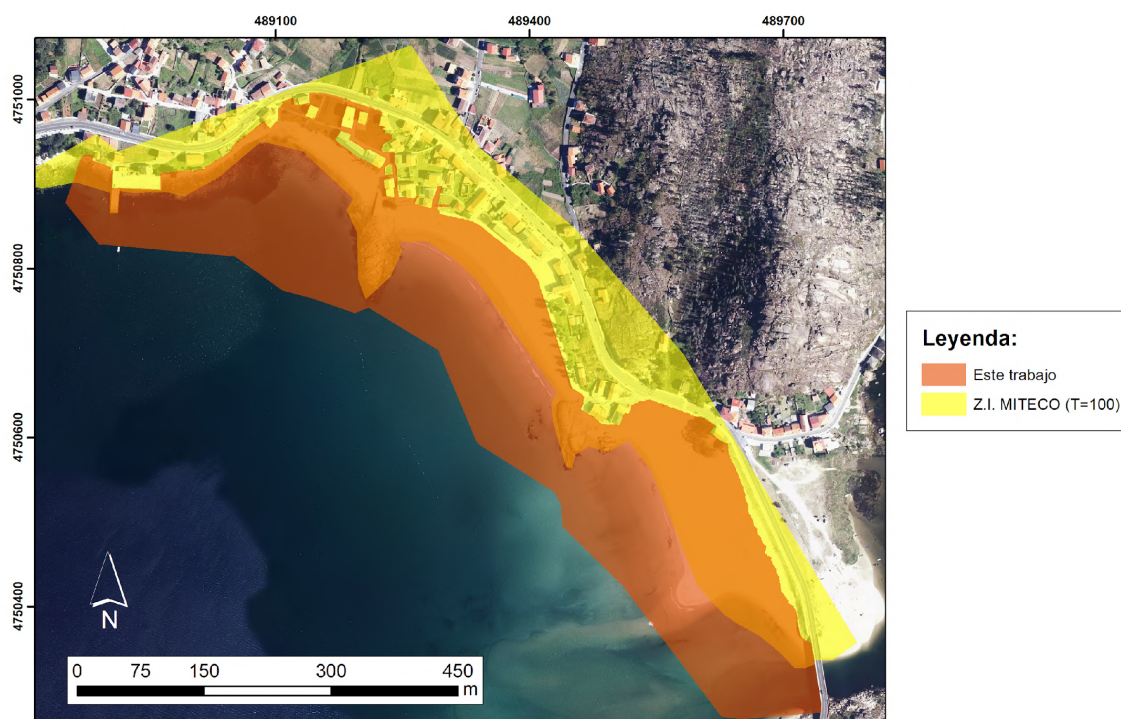


Fig. 18: Comparación Ézaro de la cartografía de Z.I del MITECO y este trabajo.

5.4 O Pindo

En O Pindo se pueden hacer dos claras distinciones (Fig. 19), al noreste, donde se ubican la mayoría de casas de la localidad de O Pindo, y otra en Punta da Cruciña.

La zona del noreste, se encuentra infraestimada por parte del MITECO, y en ningún caso alcanza alguna construcción. Aunque sí existen picos en la cartografía que alcanzan la carretera, tanto al noroeste como al norte. Por otro lado, las zonas inundables de este trabajo, llegan a sobrepasar la carretera en bastantes metros, e incluso alcanzando un gran número de casas a lo largo de toda la localidad, tanto al sur como al noroeste.

En el sur, en Punta da Cruciña, aparece una sobrestimación del MITECO, que marca la carretera y otras construcciones más allá de ésta, como zonas donde llegaría el oleaje. No obstante, las zonas establecidas en este trabajo, no llegan a superar tan siquiera la carretera, y mucho menos, cualquier tipo de construcción.

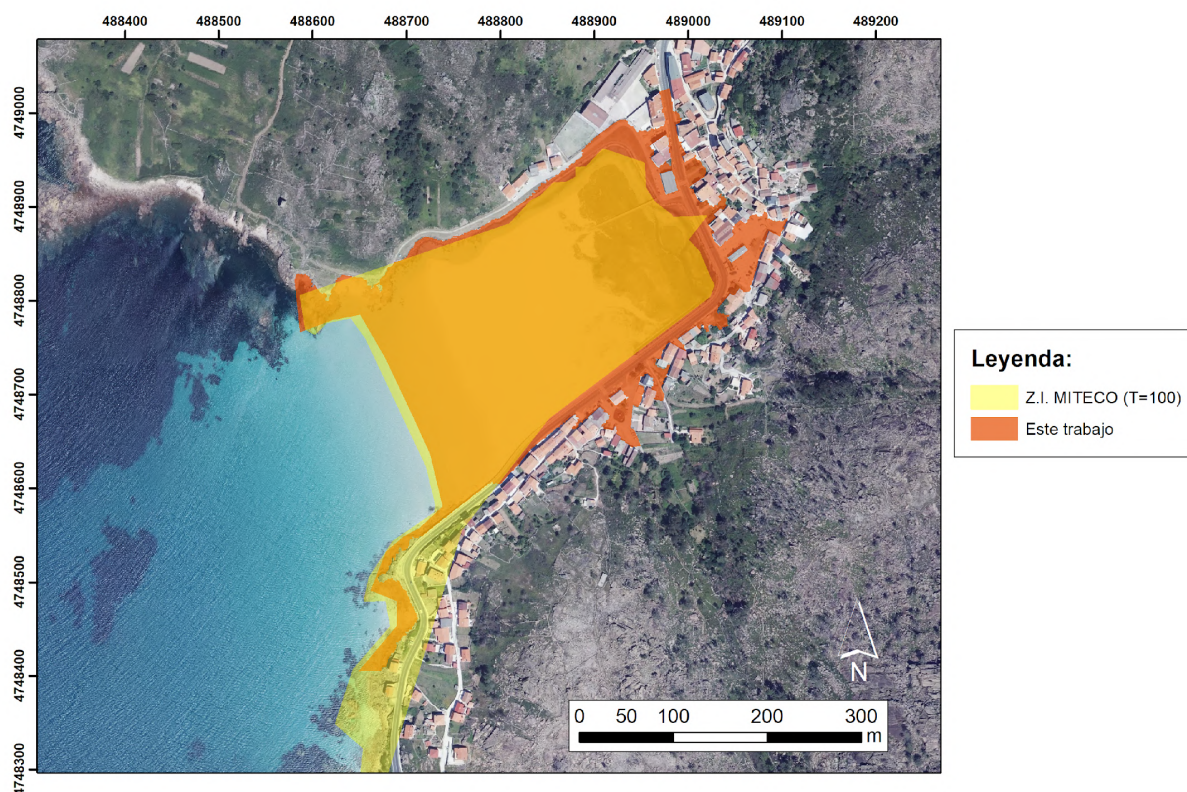


Fig. 19: Comparación en Pindo de la cartografía de Z.I del MITECO y este trabajo.

6. DISCUSIÓN

En los estudios sobre dinámica litoral, el cálculo de la propagación del oleaje en playas ha sido uno de los problemas que mayor atención han recibido, especialmente la determinación del *run-up* como principal factor responsable de los eventos de inundación costera (Stockdown et al. 2014). En buena parte de los trabajos, se ha puesto de manifiesto que la pendiente de la playa es uno de los parámetros que mayor influencia tienen en el cálculo del *run-up*. Dadas las dificultades operativas para disponer de perfiles topo-batimétricos, la mayor parte de las ecuaciones utilizan la pendiente de la playa emergida correspondiente a las cotas sobre las que se calcula el ascenso de la ola, es decir la conocida como *foreshore* (da Silva et al. 2020). El papel de la pendiente utilizada para modelizar el comportamiento de la ola es especialmente complejo en perfiles de playa disipativos con formación de barras, ya que éstas alteran de manera importante el proceso de rompiente y disipación de la ola (Cohn y Ruggiero, 2016).

A la hora de calcular el *run-up*, es necesario obtener una serie de parámetros que ayudarán a obtener la propagación del oleaje. Como se ha explicado anteriormente, el parámetro más importante y a la vez, el más sensible, es la pendiente. Al usar modelos con una resolución espacial de 0,25x0,25 m, el perfil obtenido será mucho más preciso que aquellos perfiles extraídos de MDT's con resoluciones de 5x5 metros como los del SNCZI. No obstante, pueden presentarse problemas a raíz de esta resolución tan alta, como tramos de perfil que parecen simular un gráfico de dientes de sierra, como sucedió al extraer el perfil en O Pindo. Para la fórmula del *run-up*, es necesaria la tangente de la pendiente, que se puede calcular gracias a los datos extraídos del perfil. Además de la pendiente, otro de los parámetros que se necesitan para este cálculo, es el de la altura significativa (H_s) y el periodo de pico (T_p) asociados a ese 2% de oleaje máximo.

La modelización llevada a cabo en la cartografía para el SNCZI se basa en el uso de los MDE disponibles en el IGN con resolución espacial de 5 m, y en la aplicación de una metodología mucho más compleja (Tomás et al. 2016).

Para evaluar los procesos de propagación, interacción y disipación del oleaje a lo largo de los perfiles, el IHC utiliza un modelo hidrodinámico del oleaje (IH2VOF <https://ihcantabria.com/specialized-software/ih2vof/>).

El modelo se basa en una caracterización previa del oleaje y las cotas de marea en toda la costa española a partir de datos, así como de la batimetría con una resolución espacial de 200 y 50 m respectivamente. A partir de la delimitación de un umbral de altura de ola (la superada 12 horas al año) se estima la profundidad de cierre en función de la componente de aproximación del oleaje.

El litoral se segmenta cada 200m y se generan los perfiles transversales, a partir de la integración del perfil batimétrico y el perfil topográfico. El perfil batimétrico se extrae de las cartas costeras españolas, o si no se dispone de datos batimétricos, o son de poca calidad, se genera un perfil batimétrico con el perfil teórico del modelo de Dean (1991). El perfil topográfico, es decir el de la playa, se toma del MDT con pixel de 5 m del IGN, desde la línea de costa o cero geodésico hacia el interior, con una longitud de al menos 1000 m de largo. A continuación se definen los eventos de tormenta en base a los datos de marea y altura de ola, seleccionando un total de 183 eventos en la serie de datos.

Una vez definidos los eventos, se aplicó el modelo IH2VOF en perfiles representativos para obtener los valores de *run-up*, en cota vertical y extensión horizontal, para generar un modelo extrapolable a cualquier perfil. Finalmente los resultados se depuran y se genera la cartografía a partir de la creación de

un raster y su posterior conversión a archivos vectoriales, primero de líneas y finalmente a la creación de polígonos.

La complejidad del trabajo efectuado por el IHC, cubriendo toda la costa española, exigía adoptar una metodología ágil y capaz de procesar un enorme volumen de datos. Por el contrario, en este trabajo se ha planteado una metodología simple y aplicable con modelos topográficos de alta resolución. La principal diferencia viene derivada precisamente de la posibilidad de usar MDT's con resoluciones centimétricas derivados de los vuelos LiDAR disponibles en el IGN, que obviamente implican la posibilidad de una representación mucho más precisa de la topografía emergida de las playas, pero también de las zonas potencialmente inundables.

La misma alta resolución aporta otra ventaja a la hora de determinar uno de los parámetros esenciales en los cálculos como es la pendiente de la playa. En este trabajo se ha utilizado exclusivamente la pendiente emergida o *foreshore*, sin considerar el perfil sumergido. Es innegable que esto resulta en una simplificación en los procesos de rompiente y propagación de la ola, aunque los perfiles utilizados en la cartografía del SNCZI son producto de cálculos empíricos y no de datos de campo. Si ha podido verificarse que en perfiles muy disipativos, como el caso de O Pindo, los resultados pueden ser menos fiables y requerir un mayor trabajo de depuración. Igualmente, fue necesario adecuar las pendientes obtenidas en el MDS de Ézaro a las condiciones más propias de invierno.

Pese a su sencillez, la ecuación de Komar (1989) ha generado resultados que pueden calificarse de muy válidos para la gestión y prevención de riesgos por inundación costera. Los problemas de sobre o infra dimensionado del alcance de la inundación costera se han visto sumamente minimizados con respecto a la cartografía más generalista del SNCZI.

Sin embargo, en el momento actual, recurrir a modelos de alta resolución resulta muy eficaz para estudios concretos, pero es obvio que quizá no sea viable su aplicación a un proyecto tan amplio como el acometido para el SNCZI por el IHC.

Igualmente, es importante señalar que la aplicación mediante modelos del terreno de alta resolución implica un mayor conocimiento de la morfodinámica propia de la costa sobre la que se aplica. Este conocimiento debe apoyarse necesariamente de datos de campo, como topográficos, sedimentológicos, vegetación, y de estudios de la evolución geomorfológica que permitan validar con precisión los resultados de los modelos.

7. CONCLUSIONES

Después de haber realizado todas las comparaciones entre ambos modelos, se pueden señalar una serie de conclusiones que permiten sintetizar los aspectos más importantes del trabajo:

- La mayor resolución espacial en tamaño de pixel (0.25 m) y también en la vertical (máximo de ± 40 cm) de los modelos obtenidos a partir de la nube de puntos LiDAR, presentan una mayor ventaja frente a los MDT de menor resolución (tamaño de píxel de 5 m) utilizados en la cartografía del SNCZI.
- La menor resolución en la cartografía del MITECO da lugar a valores bien sobrestimados o infraestimados en gran parte de sus resultados. Los valores sobrestimados se traducen en la inundación de edificios o puentes.
- Es sin embargo importante destacar que resulta mucho más complejo operativa y económicamente elaborar una cartografía de toda la costa de España con resoluciones espaciales altas.
- Cualquiera de los modelos empleados exigen una depuración y validación que sólo puede acometerse desde un conocimiento de la

geodinámica costera de cada zona, siendo difícil establecer criterios homogéneos para toda la costa española.

- La obtención de datos de campo previos a la ejecución de los modelos, especialmente datos de la topografía de la playa, pero igualmente otros de carácter sedimentológico, de monitorización de los cambios en las playas y de evolución geomorfológica histórica, permitiría mejorar enormemente la fiabilidad de los modelos.

- Pese a ello, una vez comprobada la precisión de estos modelos en determinadas zonas, es previsible que el uso de datos de mayor resolución espacial van a tener una gran importancia de cara al futuro, en la gestión litoral, planificación urbana y evaluación de riesgos naturales.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Capdevilla, R. y Floor, P. (1970) Les différents types de granites hercyniens et leur distribution dans le nord-ouest de L'Espagne. *Boletín Geológico y Minero*, 81: pp. 215-225.
- Cohn, N., Ruggiero, P. (2016). The influence of seasonal to interannual nearshore profile variability on extreme water levels: Modeling wave runup on dissipative beaches. *Coastal Engineering*, 115, 79-92.
- Da Silva, P. G., Coco, G., Garnier, R., Klein, A. H. (2020). On the prediction of runup, setup and swash on beaches. *Earth-Science Reviews*, 204, 103148.
- Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, 7: 53-84.
- Divar Rodríguez J. e Iglesias Ponce de León M. (1979). Mapa geológico y memoria de la hoja nº 119 (Noya). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera Edición. IGME.
- Divar Rodríguez J., Iglesias Ponce de León M. y de Pablo Maciá (1979). Mapa geológico y memoria de la hoja nº 93 (Outes). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera Edición. IGME.
-
- Eakins, B. W., y Grothe, P. R. (2014). Challenges in building coastal digital elevation models. *Journal of Coastal Research*, 30: 942-953.
- Galán Arias J., et al. (1979). Mapa geológico y memoria de la hoja nº 151 (Puebla del Caramiñán). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera Edición. IGME.

- IGN (2015) Especificaciones Técnicas para la realización del vuelo lidar que permita la obtención de información altimétrica. Descargado de http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/documentos/Especificaciones_tecnicas_LIDAR_2_cobertura.zip. Fecha de acceso: 12/11/2022.

- Komar, P.D. (1998 2ª ed.) *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall. New Jersey, 429 pp.

- Masselink, G. y Hughes, M. (2003). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Hodder & Stoughton, London. 354 pp.

- Meteogalicia (2014) Atlas de Oleaje de Galicia: Caracterización del oleaje costero con alta resolución. Xunta de Galicia, Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras. Santiago. 150 pp.

- Miller, C.L. y Laflamme, R.A. (1958). The digital terrain model - theory and application. *Photogrammetric Engineering*, 24: 433–442.

- Stockdon, H. F., Thompson, D. M., Plant, N. G., & Long, J. W. (2014). Evaluation of wave runup predictions from numerical and parametric models. *Coastal Engineering*, 92, 1-11.

- Tomás, A., Méndez, F. J., Medina, R., Jaime, F. F., Higuera, P., Lara, J. L., Álvarez de Eulate, M. F. (2016). A methodology to estimate wave-induced coastal flooding hazard maps in Spain. *Journal of Flood Risk Management*, 9(3), 289-305.