# Metodología para la delimitación de la zona de inundación del oleaje en el Mapa para la Prevención de Riesgos Geológicos de Cataluña

## *Coastal flooding assessment on the Map for the Prevention of Geological Hazards in Catalonia.*

**J. Pinyol[1], M. García-León[2], M. González[1], J. Lin-Ye[2], P. Oller[1], V. Gracia[2] y A. Sánchez-Arcilla[2]**

1 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya; Parc de Montjuïc, Barcelona, 08038; Jordi.Pinyol@icgc.cat
2 Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya, C/Jordi Girona 1-3, Barcelona, 08034, manuel.garcia-leon@upc.edu

**Resumen:** El Mapa para la Prevención de Riesgos Geológicos a escala 1:25.000 (MPRG25M) del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya es un mapa multi-peligrosidad que incluye la representación de los fenómenos y indicios de actividad, así como las zonas susceptibles y la peligrosidad natural de los procesos generados por la geodinámica externa y interna. En el caso de los riesgos costeros una de las peligrosidades evaluadas es la inundación costera. Tradicionalmente la inundación costera ha sido analizada a través del cálculo del remonte del oleaje mediante ecuaciones empíricas simples. El desarrollo de modelos numéricos permite abordar el problema desde una perspectiva más completa. El artículo muestra la metodología utilizada en el MPRG25M para determinar las zonas potenciales a la inundación a partir de la definición de una serie de escenarios extremos y la combinación de modelos numéricos hidrodinámicos y morfodinámicos en 2DH. Esta aproximación permite una gran resolución espacial y una reproducción del proceso más realista al considerar la playa como un elemento dinámico que interacciona con el oleaje incidente. A modo de ejemplo, la metodología utilizada se presenta para las playas del Golfo de Roses.

**Palabras clave:** Inundación costera potencial, modelado numérico, mapa de prevención de riesgos naturales, costa catalana.

***Abstract:*** *The Geological Hazard Prevention Map of Catalonia 1:25000 (MPRG25M) developed by the Cartographic and Geological Institute of Catalonia is a multi-hazard map which includes the representation of evidence, phenomena, susceptibility and natural hazards generated by external and internal geodynamics. One of the coastal hazards mapped is coastal flooding. Coastal flooding is typically analyzed through the evaluation of wave run-up using simple empirical equations. The use of numerical models gives more detailed information. The paper shows the methodology used in the MPRG25M to determine areas prone to flooding. A set of extreme scenarios are defined and modeled through a 2DH coupled hydro-morphodynamic model. This approach allows a high spatial resolution providing a more realistic reproduction of the process by considering the beach as a dynamic element that interacts with the incident waves. The methodology is presented for the beaches of the Gulf of Roses as a case study.*

***Key words:*** *Potential coastal flooding, numerical modeling, natural hazard prevention map, Catalan coast.*

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los fenómenos de dinámica litoral en Catalunya ligados a temporales han causado importantes daños materiales, muestra de ello es el temporal de San Esteban de 2008 en la costa norte catalana. En el pasado también se han documentado temporales importantes que han producido consecuencias catastróficas sobre el territorio (Carbonell, 2012). Un estudio reciente ha calculado durante el periodo 1958-2008 que los daños producidos por temporales han crecido un 40% por década (Jimenez *et al*, 2012).

En cumplimiento a las funciones que otorga la Ley 2/2014 de creación del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) y la supresión del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) y del Institut Geològic de Catalunya (IGC), se inició en 2007, el Mapa para la Prevención de los Riesgos Geológicos 1:25.000 (MPRG25M) (Oller *et al.*, 2011), constituido por 304 hojas que cubren la totalidad del territorio catalán. Este plan de cartografía se engloba dentro de los "Geotrabajos" que realiza el ICGC, y que tienen como objetivo adquirir, elaborar e integrar la información geológica, edafológica y geotemática, a escalas adecuadas para la planificación territorial y el urbanismo.

La franja litoral, motivo de este artículo, está presente en 46 hojas del MPRG25M. Y es en este tramo dónde se encuentra gran parte de la población y de los motores económicos de Cataluña, de ahí la importancia de su análisis y cartografía. La cartografía de esta franja se aborda desde dos enfoques, las peligrosidades producidas por la dinámica de ladera (deslizamientos, desprendimientos, etc.) y las producidas por la dinámica litoral ligada al oleaje y

nivel medio del mar. En este artículo sólo nos referiremos a esta última dinámica.

La metodología utilizada para evaluar los fenómenos litorales potencialmente peligrosos ha sido desarrollada por el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universitat Politècnica de Catalunya (LIM-UPC) siguiendo las directrices del MPRG25M. La premisa principal es que su aplicabilidad sea homogénea y continúa para todo el territorio.

Toda la información obtenida en la realización del MPRG25M, se integrará en el Sistema de Información de Riesgos Geológicos de Cataluña (SIRGC) que actualmente se encuentra en fase de diseño según las directrices europeas INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in the European Community*).

## EL MAPA DE PREVENCIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS DE CATALUÑA

El MPRG25M se ha concebido como un mapa multi-peligrosidad, donde se indica la superposición de diferentes peligrosidades en una misma zona. Su objetivo es dar una visión de conjunto del peligro geológico identificado en el territorio y recomendar la realización de estudios de detalle en caso de planificar actuaciones en zonas señaladas como peligrosas (Oller *et al*., 2011).

En el MPRG25M se representan los fenómenos e indicios de actividad, así como las zonas susceptibles y la peligrosidad natural de los procesos generados por la geodinámica externa (dinámicas de ladera, torrencial, nival, fluvial y litoral) y la interna (sismicidad). En el mapa no se han considerado aquellas zonas susceptibles a que se genere peligrosidad por causas antrópicas. Cada hoja consta de diversas ventanas donde la información se representa a diferentes escalas. El elemento central de la hoja corresponde al mapa principal (Fig. 1). Alrededor de éste se distribuyen un conjunto de elementos periféricos que corresponden a los mapas complementarios, a escala 1:100.000, y a los mapas adicionales de peligrosidad, a escala 1:50.000, así como sus leyendas y textos explicativos.

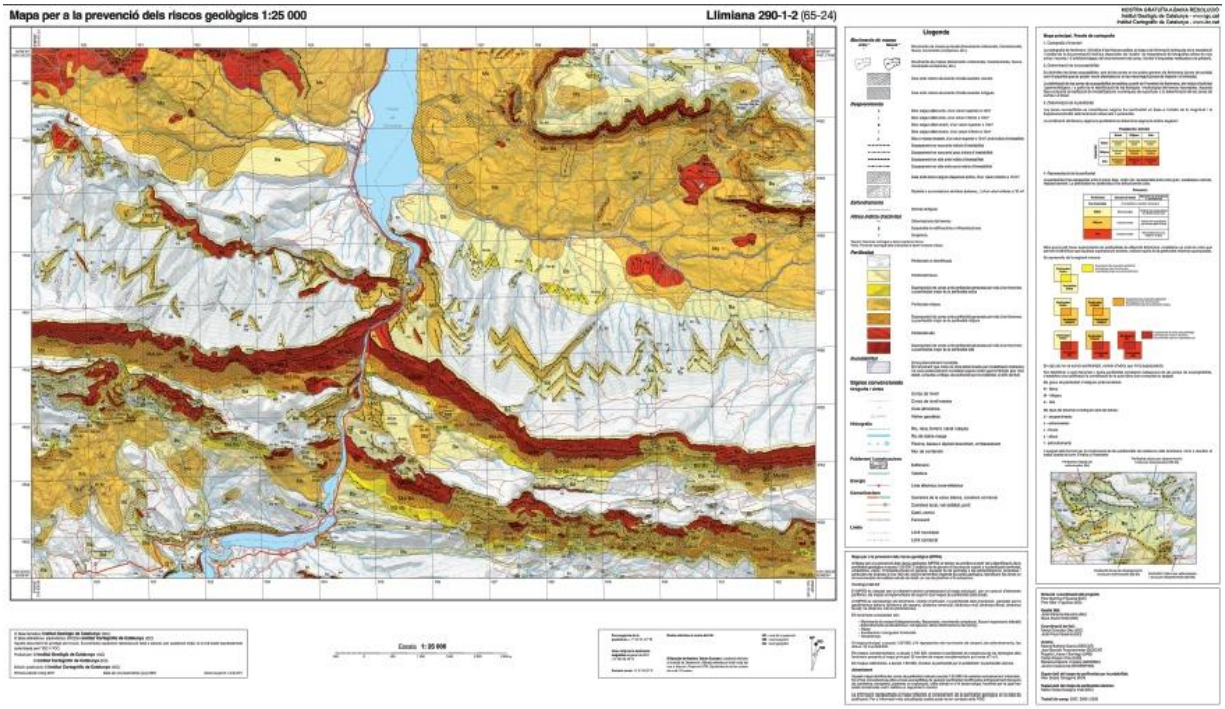


FIGURA 1. Fragmento del Mapa para la prevención de los riesgos geológicos 1:25.000. Hoja de Llimiana 290-1-2(65-24), mapa principal y leyenda, http:\\www.icgc.cat.

## LAS PELIGROSIDADES COSTERAS EN EL MPRG25M

El análisis de la evolución costera reciente del litoral catalán (CIIRC, 2010), así como la recopilación de estudios existentes de dinámica costera (Sánchez-Arcilla *et al*. 2014, Gràcia *et al*. 2013) ha permitido identificar tres peligrosidades de relevancia para el MPRG25M: las generadas por la erosión, la acumulación y la inundación.

Las metodologías desarrolladas para la cartografía de los fenómenos litorales se han abordado desde diferentes puntos de vista, en función de las características propias de cada fenómeno a representar y teniendo en cuenta las escalas de tiempo en las que tales procesos son relevantes. A continuación se describen brevemente las aproximaciones utilizadas.

La erosión de las playas de arena ha sido considerada desde tres horizontes temporales: el episódico (escala de horas), a medio plazo (decenas de años) y a largo plazo.

La erosión episódica, debida a la acción de los temporales, se determina mediante la combinación de modelos de propagación del oleaje y modelos de evolución morfodinámica de las playas. Se consideran temporales con un periodo de retorno de 10, 50 y 100 años. Adicionalmente, se calcula el efecto de ese oleaje bajo un escenario de aumento del nivel del mar de 0,6 m y que se corresponde con la proyección para el año 2100 para el escenario RCP 8,5 en el Mediterráneo Noroccidental (IPCC, 2013). La rotura de playas barrera ha sido definida como un caso particular de erosión asociada a temporales y caracterizada de forma específica en el MPRG25M. Así mismo, la rotación de la orilla en playas encajadas, asociada típicamente a eventos de alta energía, ha sido identificada a partir del análisis de las fotografías aéreas de diferentes años disponibles en el ICGC. Se han considerado como playas susceptibles a bascular aquellas que por sus características físicas y su disposición frente al oleaje son análogas a las observadas pero que no se han identificado en las fotografías aéreas debido a la dificultad intrínseca de ser detectadas.

La erosión a medio plazo se ha establecido en base a los datos de evolución de la línea de la costa del periodo de tiempo 1995-2005 de acuerdo con los resultados obtenidos en CIIRC (2010). El estudio determina la tasa de avance/retroceso a partir del análisis de la evolución de la costa cada 150 m aproximadamente. Las tasas han sido calculadas mediante regresión lineal de las posiciones de las distintas líneas de orilla digitalizadas en cada transecto.

La erosión a largo plazo se establece en base a la regla de Bruun (1962) y considerando un aumento de 0,6 m del nivel medio del mar, para el RCP 8,5. Se asume que el perfil de playa se comporta a esa escala de tiempo (a un centenar de años) como un perfil en equilibrio tipo Dean (1977) y por tanto dependiente exclusivamente del tamaño del sedimento. La impronta de tal peligrosidad es evaluada para el año 2100.

De todos los tipos de acumulación de sedimentos que se pueden producir en la zona litoral, solo se tiene en cuenta el aterramiento que se produce en bocanas de puertos, desembocaduras y entradas de bahías. Su definición se establece a partir de la observación del fenómeno mediante el análisis de las fotografías aéreas o su conocimiento documentado.

La inundación producida por la acción combinada del oleaje y nivel medio del mar es tratada en detalle en el siguiente apartado.

## METODOLOGIA PARA LA DELIMITACIÓN DE LA ACCIÓN DEL OLEAJE EN EL MPRG25M

La acción de los temporales en los últimos años ha puesto de manifiesto la vulnerabilidad de la costa catalana a la inundación (Fig. 2). Sin embargo dada su naturaleza episódica esta peligrosidad ha sido tratada desde un punto de vista numérico a partir del modelado de la propagación del oleaje y su interacción con la playa en condiciones extremas. La batimetría se define con una malla no estructurada de densidad variable entre 500 m (aguas profundas) y 5m (aguas someras), cuyos datos de partida proceden de la digitalización de cartas náuticas y de estudios anteriores. La parte emergida, por otro lado, utiliza un MDT de 2x2 m proporcionado por el ICGC.

FIGURA 2. Efectos del temporal de diciembre de 2008 en Tossa de Mar. Autor: Fran Hervías.

El esquema es similar al utilizado en la caracterización de la erosión episódica:

1. Se definen las condiciones de oleaje de temporal para períodos de retorno de 10, 50 y 100 años. Estos escenarios se definen como la situación actual.
2. A cada periodo de retorno se le asignan distintas direcciones de oleaje de acuerdo con la orientación de la playa. Cada dirección de oleaje lleva asignada una intensidad de temporal distinta según los valores registrados por la boya más cercana.
3. La propagación de este oleaje se modela desde aguas abiertas hasta un calado aproximado de 15 m mediante el modelo SWAN (Booj *et al*. 1999).
4. La inundación de este oleaje se modela de forma detallada mediante el modelo de respuesta morfodinámico XBEACH (Roelvink *et al*., 2009).
5. Se identifica la lámina de agua con un calado mínimo de 0.1 m para cada dirección y se obtiene la envolvente.

Las condiciones de temporal han sido definidas a partir del análisis de extremos obtenido en CIIRC (2010). En todos los casos se utiliza una evolución del temporal triangular simétrica con una duración total de 24 horas y que se corresponde con el tiempo medio de duración de los temporales en el Mediterráneo Noroccidental (CIIRC, 2010).

El procedimiento anteriormente descrito se realiza además para un escenario futuro de cambio climático asumiendo un aumento del nivel del mar de 0,6 m de acuerdo con el escenario RCP 8,5 para el año 2100, manteniendo el régimen de oleaje de extremos presente. La Fig. 3 muestra la definición de la envolvente de inundación para un escenario futuro de un temporal con un periodo de retorno de 100 años en clima actual (verde) y un ascenso del mar de 0,6 m para el año 2100 en la playa de Sant Pere Pescador (rojo). La acción conjunta del oleaje y la subida del nivel del mar implica un incremento de la peligrosidad significativo para un mismo periodo de retorno.

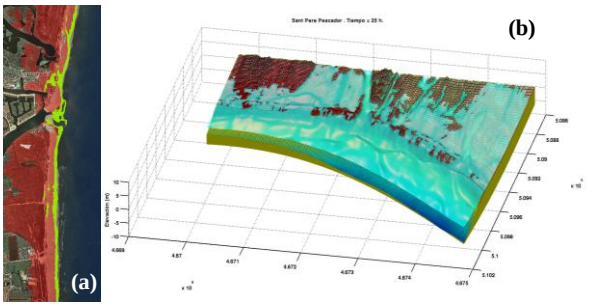


FIGURA 3. (a) Envolvente de la lámina de inundación para un período de retorno (Tr) de 100 años en Sant Pere Pescador. En rojo en 2100 y en verde en la actualidad. (b) Representación tridimensional de la lámina de inundación en la misma zona para un temporal de levante para el mismo Tr, en 2100.

## RESUMEN

La metodología utilizada permite caracterizar la línea de inundación desde un punto de vista más realista puesto que la playa es tratada como un elemento dinámico (no estático) que interacciona con las condiciones de oleaje incidentes en cada momento.

Si bien la Directiva 2007/60/CE recomienda tratar los fenómenos de inundación bajo los escenarios de probabilidad alta (10 años), media (100 años) y baja (500 años), la duración de las series temporales disponibles hacen que el uso de condiciones extremas este sujeto a un muy alto grado de incertidumbre. El uso de periodos de retorno más bajos permite por un lado reproducir condiciones más probables y acortar su incertidumbre asociada.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido realizado en el marco de colaboración entre el ICGC y LIM-UPC. Parte de la metodología y de los datos utilizados han sido desarrollados y obtenidos en el marco de los proyectos europeos iCoast (661ECHO/SUB/2013/009) y RISES-AM (FP7-ENV-693396).

## REFERENCIAS

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., (1999), ‘A third-generation wave model for coastal regions, part I: model description and validation’, *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4), 7649-7666

Brunn, P. 1962. Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. *Journal of Waterways and Harbor Division*, American Society of Civil Engineers, 88, pp 117-130.

Carbonell, E. (2012): El temporal de 1911 a Catalunya: La patrimonialització de les catàstrofes naturals. En: *La patrimonialització de la cultura marítima*. (J. Ll. Alegret, E. Carbonell, eds.). ICRPC Llibres; 10.

Centre Internacional d‘Investigació dels Recursos Costaners, CIIRC. 2010. *Estat de la zona costanera a Catalunya*, Vol I, II, III I IV. Barcelona. Generalitat de Catalunya.

Dean, R. G. 1977. *Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts*. Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report No. 12, University of Delaware, Newark, DE.

Gràcia, V., García-León, M., Grifoll, M. and Sánchez-Arcilla, A. 2013. Breaching of a barrier under extreme events. The role of morphodynamic simulations, *J. Coastal Res*., 65, 951-956.

IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Stocker, T.F., D. Qin, G.-K.Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V.Bex and P.M. Midgley eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Jimenez, J.A.; Sancho-Garcia, A.; Bosom, E.; Valdemoro, H.I. y Guillen, J., (2012): Storm-induced damages along the Catalan coast (NW Mediterranean) during the period 1958-2008. *Geomorphology*, 143, 24-33.

Oller, P., González, M., Pinyol, J., Barberà, M., Martínez, P. (2011). The geological hazard prevention map of Catalonia 1:25 000. A tool for geohazards mitigation. En: *Proceedings of the Second World Landslide Forum – 3-7 October 2011*, Rome. 6p.

Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R. & Lescinski J. 2009. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, 56, Issues 11-12.

Sánchez-Arcilla, A., García-León, M., and Gracia, V. (2014). ‘Hydro-morphodynamic modelling in Mediterranean storms – errors and uncertainties under sharp gradients’, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2993-3004