

# Identificación y análisis de eventos marítimos de alta energía como variables explicativas de procesos erosivos costeros a escala regional.

## *Identification and analysis of wave energy events as triggering variables of coastal erosion processes at regional scale.*

E. Guisado-Pintado<sup>1</sup>, JM. Camarillo<sup>2</sup> y J. Ojeda<sup>3</sup>

Dpto. Geografía y Análisis Geográfico Regional, Facultad de Geografía e Historia, Universidad de Sevilla 41004 Sevilla (Andalucía).

<sup>1</sup>[eguisado@us.es](mailto:eguisado@us.es); <sup>2</sup>[jmcamarillo@us.es](mailto:jmcamarillo@us.es); <sup>3</sup>[ojeda@us.es](mailto:ojeda@us.es)

**Resumen:** El clima marítimo desempeña un papel clave en la evolución y estado morfodinámico de la costa. Particularmente, los eventos de alta energía y, entre ellos los temporales, son uno de los responsables de los grandes cambios en la costa a escalas temporales cortas (procesos erosivos y de acreción). La costa de Andalucía, situada en la confluencia del Atlántico y el Mediterráneo, es geomorfológicamente compleja y diversa lo que se traduce en la existencia de unidades litorales con comportamientos morfodinámicos variados. Mediante el análisis conjunto de los eventos y temporales ocurridos en los últimos 50 años se investigan las variables explicativas responsables de la erosión ocurrida en la costa Andaluza para 5 periodos comprendidos entre 1956 y 2011, en el marco del proyecto Nacional “E\_Coastand II”. Metodológicamente se han definido, analizado y cuantificado los eventos y temporales ocurridos en aguas profundas (red SIMAR) en base al clima medio y extremo para ambos sectores costeros a través de la altura significativa de ola, la duración y dirección del evento. La integración y modelado de los datos brutos y calculados (Índice de Potencia de Oleaje) en una base de datos espacial (PostgreSQL/PostGIS) permite el análisis de los eventos de alta energía a través de consultas SQL espaciales (modificando en tiempo real los parámetros que los definen), así como acceder a su representación gráfica en un Geovisor web. A su vez, la incorporación en este Geovisor permitirá al usuario el análisis espacial y temporal conjunto de las tasas de erosión de playas y sus variables explicativas, en este caso las derivadas del clima marítimo.

**Palabras clave:** altura significativa de ola, temporales, tasas de erosión, PostgreSQL/PostGIS, SIMAR.

**Abstract:** *Wave climate plays a key role in the evolution and morphodynamic beach state. Particularly, high energy events and wave storms drive beach changes at short term scales (erosion and accretion processes). The Andalusian coast, in the confluence between the Atlantic and the Mediterranean sea, is from a geomorphological point of view complex and diverse leading to the presence of coastal units with opposite morphodynamic behaviour. Through the joint analysis of high energy events and storms occurred during the past 50 years, we investigate the main drivers of the erosion occurred between 1956 and 2011, within the framework of the National Ministry Project “E\_Coastand II”. The methodology comprises the definition, analysis and quantification of offshore events and storms (by using the SIMAR network) based on the mean and extreme wave climate for each sectors (by using the significant wave height, duration and event orientation). The integration and modelling of raw and calculated data (e.g. Wave Storm Power) on a spatial database (PostgreSQL/PostGIS) allows a detailed analysis through SQL petitions (by modifying in real time the parameters) and its graphical representation on a web Geoviewer. Furthermore, the integration on a web viewer will facilitate the end user a combined spatial and temporal analysis of the beach erosion rates and their explicative variables (drivers), in this particular case the ones derived from the maritime climate.*

**Key words:** *significant wave height, storms, erosion rates, PostgreSQL/PostGIS, SIMAR.*

## INTRODUCCION

Dada la importancia de los eventos de alta energía (tormentas y temporales) en la costa, el análisis del régimen e impacto de los mismos se ha convertido en una herramienta clave en la gestión costera, planificación y regulación de usos a corto-medio plazo, así como de cara al diseño de medidas de mitigación y adaptación. Son numerosos los estudios basados en la caracterización del clima extremo y la identificación de tormentas (Rodríguez et al., 2003; Rangel-Buitrago y

Anfuso, 2013; Guisado-Pintado et al., 2014; Dissanayake et al., 2015; Masselink et al., 2015), existiendo, por tanto, diferentes aproximaciones. Los eventos de alta energía son uno de los principales responsables de los cambios en la morfología costera y de la disponibilidad de sedimentos en escalas temporales cortas. De igual modo, las tormentas están asociadas con episodios de erosión costera, inundaciones y daños en las infraestructuras, propiedades y servicios (puertos, paseos marítimos carreteras). Las tormentas más energéticas y con alturas de olas mayores generalmente causan un daño mayor

(erosión de la playa y escarpes en dunas), así mismo la duración, la dirección, el periodo pico y la altura del nivel mar también contribuyen al fenómeno. Del mismo modo, la ocurrencia de un grupo de tormentas o clúster, puede resultar en un impacto más severo comparado con el de una única tormenta con las mismas condiciones (Dissanayake et al., 2015).

Dada la variabilidad de condiciones asociadas a las áreas costeras, no existe un criterio común para la caracterización de tormentas. Sin embargo, en la mayoría de los estudios la caracterización de eventos de alta energía se realiza a través de la identificación de episodios en los que la altura significativa de la ola (Hs) en alta mar alcanza unos valores límite (excedencia del 1%-5%) dentro de la serie temporal de oleaje (Masselink et al., 2015). Otros criterios a considerar son aquellos que permitan garantizar la independencia entre temporales, así como los clústeres de tormentas, que varían según el área de estudio. Finalmente, la duración mínima del evento es crucial ya que indica no solo la cantidad de energía procedente del oleaje que alcanza la costa, y también la conjunción con las mareas. Para el Gobierno Regional de Andalucía (CMA, 2003) un evento es considerado una tormenta cuando dura al menos 5 horas y supera los 2 m en el Mediterráneo y los 2.5 m en el Atlántico, mientras que para otros autores (Rangel-Buitrago y Anfuso, 2013) debe ser de 12 horas para garantizar que coincida con la pleamar. Por tanto, la definición de tormentas es específica para cada sitio y normalmente la Hs elegida debe ser representativa de la zona para identificar los eventos de tormenta.

Este trabajo se plantea complementario al desarrollado en el marco del proyecto “*E\_Coastand II*”, en el que se han calculado tasas de erosión costera en todas las playas expuestas de Andalucía (640 km) a partir de ortofotos (acceso público y gratuito a través de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía). Mediante la aplicación de la herramienta DSAS (Digital Shoreline Analysis System, Thieler et al., 2005) se han calculado a escala de detalle (1:2500) las tasas de erosión/acreción para los periodos 1956-1977-2001-2011, utilizando varios indicadores o proxis (Prieto et al., 2017). Los resultados se han integrado en una base de datos espacial y un geovisor web para el análisis conjunto con otras variables relacionadas, como la ocurrencia de tormentas que se detalla en este trabajo. De esta forma, se investigan los eventos de alta energía (tormentas y temporales) ocurridos en los últimos 55 años y su efecto en costa andaluza, concretamente a través de las tasas de erosión calculadas mediante el modelado de los datos en una base de datos espacial (PostgreSQL/PostGIS).

### Área de estudio

La costa de Andalucía se caracteriza por presentar gran diversidad fisiográfica y morfológica a lo largo de sus 1100 km de extensión. La vertiente Atlántica tiene una pendiente suave (la plataforma continental se

extiende hasta la isobata de 100 m) donde predominan las playas arenosas con formaciones dunares de entidad. Por su parte, la costa Mediterránea andaluza presenta una plataforma continental con fuerte pendiente que se traduce en playas estrechas, frecuentemente interrumpidas por cabos y formaciones rocosas y donde predominan los materiales gruesos. A pesar de que Andalucía no se encuentra en el área de influencia de los ciclones tropicales, tiene una intensa actividad en lo que a tormentas se refiere. Los eventos y temporales difieren significativamente en ambas vertientes: en la fachada atlántica la anchura de la plataforma permite el desarrollo de olas tipo swell que se aproximan desde lejanos centros de bajas presiones con una dirección predominante del W-NW y en algunos casos SW. En el Mediterráneo, las tormentas tienen su origen en la cuenca y alcanzan la costa desde el este. Dado que el fetch es limitado el oleaje predominante es de tipo sea, lo que limita el desarrollo de las tormentas, en términos de Hs y duración (Guisado-Pintado et al., 2014).

### METODOLOGÍA

Los puntos SIMAR, pertenecientes a Puertos del Estado (Ministerio de Fomento), comprenden series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico con cadencia horaria y que se extiende desde 1958 hasta la actualidad. Dado que se localizan a gran profundidad no se ven afectados por fenómenos locales de viento y oleaje (refracción) y, por tanto, cada punto proporciona observaciones representativas de grandes zonas costeras. Para el análisis del clima marítimo, la serie temporal comprendida entre 1958-2011 del modelo SIMAR fue tratada estadísticamente con el fin de caracterizar tanto el clima medio como los eventos de alta energía registrados en la costa Atlántica y mediterránea (Fig 1). En este trabajo un evento viene definido por el periodo de tiempo de, al menos 12 horas, (para que sea coincidente con la pleamar) en el que se cumpla que  $H_s \geq 2.5$  m en el Atlántico y  $\geq 2.0$  m en el Mediterráneo. Para los temporales estos valores de Hs se fijan en  $\geq 4.0$  m y  $\geq 3.5$  m respectivamente. Un evento/temporal solo termina cuando, pasadas las primeras 12 h, en las siguientes 6 h (1/2 del régimen mareal) de duración del evento la Hs no supera el umbral establecido, lo cual a su vez permite separar y agregar grupos de eventos entre sí. Finalmente se aplica el conocido *Storm Power Index* (Dolan y Davis, 1992), que categoriza las tormentas de acuerdo a su intensidad usando la Hs y la duración (h) como parámetros.

Para el análisis de los datos se ha diseñado una base de datos espacial Postgis en el que se han modelado los eventos y los temporales según los criterios anteriormente mencionados de Hs y duración continuada a partir de los datos originales de SIMAR.

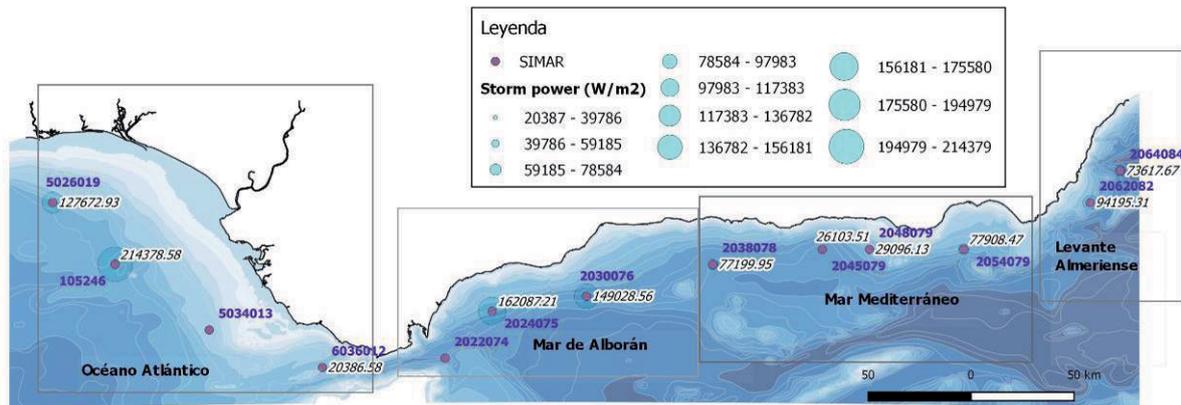


FIGURA 1 Zonificación área de estudio y puntos SIMAR. En cursiva el Storm Power total para cada punto para el periodo 1958-2011.

Para ello se han diseñado el conjunto de vistas SQL espaciales que permiten el cálculo de los estadísticos seleccionados a partir de la definición por parte del usuario final (cliente) del periodo temporal de consulta. Este esquema permite una flexibilidad absoluta en la selección de los periodos de tiempo para los que los cálculos se actualizan de manera automática, permitiendo al usuario final establecer la relación entre los periodos y las fechas de erosión costeras disponibles y los estadísticos definitorios de los eventos y temporales a partir de la selección temporal más adecuada definida por dicho usuario.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta aproximación metodológica nos permite interpretar el cálculo de las tasas de erosión a través del análisis global y por periodos, así como el estudio de casos concretos. En el primer caso, para la interpretación de las tasas totales los resultados muestran que el número total de eventos para la costa andaluza en el periodo 1958-2011 fue de 4291, con 873 eventos registrados en el Atlántico, 1600 en el Mar de Alborán, 931 en el Mediterráneo oriental y 887 eventos en el levante almeriense respectivamente (Fig 1). Es necesario aclarar que un mismo evento puede, y normalmente así ocurre, registrarse en varios puntos SIMAR con intervalos de horas de diferencia. La Hs media de dichos eventos varía entre 3.05 m en el Atlántico y entre 2.46 m y 2.35 m en el mar de Alborán y el mediterráneo occidental. La dirección media de viento fluctúa entre 217° (SO) en la fachada Atlántica, 100° (E) en Alborán y levante almeriense, y 160° (SE) para el resto de la costa mediterránea. En cuanto a la potencia asociada a las tormentas, la energía total asociada es bastante variable con valores que van desde 215.000 m<sup>2</sup>/h en el Atlántico, 162.000 m<sup>2</sup>/h en el mar de Alborán, 25.000 m<sup>2</sup>/h en el mediterráneo oriental y hasta 90.000 m<sup>2</sup>/h en el levante de Almería. Estos datos revelan que es la costa atlántica andaluza la que ha recibido mayor energía (en términos de duración y Hs); sin embargo, el número total de eventos registrados en el Mar de Alborán (606 y 596 para los SIMAR 5026019/105246), y en menor medida en la costa

oriental almeriense con 530 en el SIMAR 2054079, es significativamente mayor.

El desarrollo de la aplicación SQL/PostGres permite realizar consultas detalladas de toda la base de datos (más de 5 millones de registros), agrupados por fechas o de forma individual, por zonas de estudio, así como calcular los estadísticos de cada una de las variables consideradas (Hs y periodo medio, duración del evento y el temporal, dirección, etc.). En la Fig.2 se muestra un resumen de los resultados de eventos y temporales obtenidos por periodos (coincidentes con los usados en las tasas de erosión), a través de los SIMAR representativos de las 4 grandes zonas analizadas de la costa andaluza. En base a estos resultados, se observa como en el Mar de Alborán y el Levante Almeriense se concentran el mayor número de eventos, particularmente en el periodo 1978-2001 con más de 200 eventos. Igualmente destacable es el número total de eventos, hasta 1052, registrados en la totalidad de costa en el último periodo analizado 2002-2011, por otro lado el de menor duración. Para todos ellos, se aprecia, sin embargo que la duración media y la Hs va disminuyendo hacia el este, mostrando valores más altos en la costa atlántica y menores en el levante almeriense.

Dado que las tasas de erosión son sensibles al momento en el que se tomó la ortofotografía, ya que la línea de costa se digitaliza para esa fecha y por tanto la tasas también, esta aproximación permite contrastar los resultados del cálculo con la ocurrencia de eventos de alta energía antes y después del cálculo de la tasa para cada periodo. Esto se ilustra a través de dos ejemplos. Uno es el caso del Delta La Rabita en la costa Mediterránea (Granada) donde la fuerte progradación (+3.11 m/periodo, +5800 m lineales de playa) detectada en el periodo 1956-1977 responde a fenómenos fluviales-terrestres asociados a la riada de octubre de 1973 (no identificándose tormentas en las fechas próximas al evento). Estando el siguiente periodo (1977-2001) dominado por los procesos erosivos (-0.53 m/periodo y cerca de -5000 m lineales de playa) en los que se aíslan con hasta 173 eventos de oleaje de alta energía.

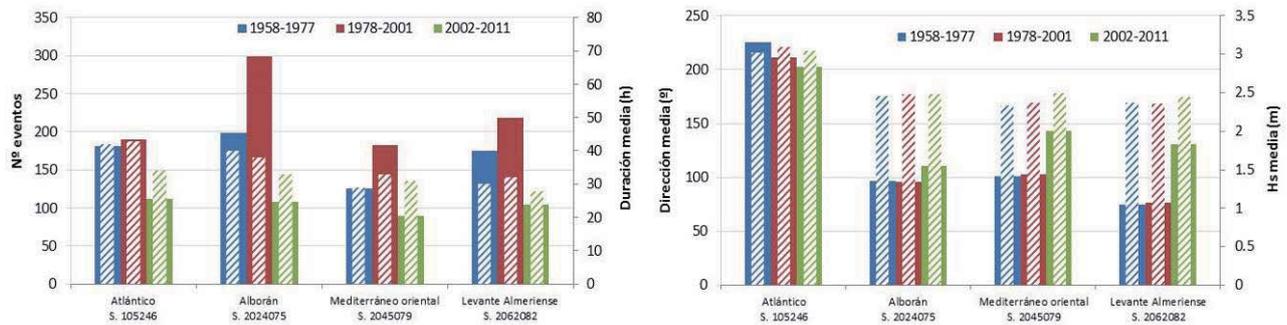


FIGURA 2. Análisis de eventos por periodos en las cuatro grandes zonas costeras estudiadas. Nota: En rallado se representa la duración media (horas) de los eventos para ese periodo y la altura de ola media (Hs, m).

El caso contrario se produce en Isla Cristina con la evolución de la isla-barrera litoral (conocida como Isla del Moral) que responde fundamentalmente a agentes marítimos, y más concretamente al efecto del oleaje de alta energía (eventos). En 1974, se suceden una serie de temporales de poniente (hasta 7 consecutivos con valores de Hs de 2,83 m; duración: 40 h y Storm power:  $343 \text{ W/m}^2$ ) que desencadenan la ruptura de la isla-barrera. Esto se traduce en unas tasas de  $0,47 \text{ m/periodo}$  ( $-650 \text{ m lineales}$ ) para el periodo 1956-1977 (siendo la ortofoto de 1977 la que se usa para el cálculo de las tasas de erosión y por tanto justo después del evento) que solo pueden explicarse mediante el análisis conjunto de los eventos de alta energía y las tasas de erosión calculadas.

El análisis conjunto de los eventos de alta energía y la evolución de la costa (tasas de erosión) son una primera aproximación a la identificación de las variables explicativas que han dominado los procesos costeros en las últimas décadas. Las futuras líneas de trabajo se centrarán en la propagación y análisis detallado en las zonas someras (*nearshore*) de dichos eventos, la comparación de dichos eventos con la red de medida existente (Boyas de aguas profundas y costeras) y la búsqueda de otras variables explicativas de procesos a escala local.

## CONCLUSIONES

Los eventos de alta energía juegan un papel muy importante en la evolución morfodinámica de la costa, siendo además claves para entender procesos a diferentes escalas. Mediante la integración de extensas series temporales de oleaje en una base de datos espacial (PostgreSQL) que integra en su modelo de datos tanto los resultados de las tasas, como un conjunto de información temática asociada a la línea de costa (tipología geomorfológica, presencia de infraestructuras, presencia de dunas) ampliándose las posibilidades de análisis y explotación de los eventos de alta energía como variables explicativas de la evolución de la costa en las últimas décadas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del Proyecto del Plan Nacional "E\_Coastland\_2" (ref. CSO2014-51994-P). Las series de oleaje SIMAR han sido facilitadas por Puertos del Estado (Ministerio de Fomento).

## REFERENCIAS

- CMA (Consejería de Medio Ambiente), 2003. *Informe de Medio Ambiente de Andalucía (IMA)*. Junta de Andalucía, 495 pp.
- Dissanayake, P., Brown, J., Wissec, P. and Karunarathnad, H. 2015. Comparison of storm cluster vs isolated event impacts on beach/dune morphodynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 164, 301-312.
- Dolan, R., y Davis, R.E., 1992. An intensity scale for Atlantic coast northeast storms. *Journal of Coastal Research*, 8, 352-364.
- Guisado-Pintado, E., Malvárez, G., Navas, F. y Carrero, R. (2014): Storms based morphodynamics from wave energy dissipation for beach characterisation. *Journal of Coastal Research*, 70: 260-265.
- Masselink, G., Austin, M., Scott, T., Poate, T. and Russell, P. 2015. Role of wave forcing, storms and NAO in outer bar dynamics on a high-energy, macro-tidal beach. *Geomorphology*, 226, 76-93.
- Prieto, A., Díaz Cuevas, P., Ojeda Zujar, Guisado-Pintado, E. (2017): 50 Years of coastal erosion analysis: A new methodological approach. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 19, EGU 2017-10509-1.
- Rangel-Buitrago, N. y Anfuso, G., 2013. Winter wave climate, storms and regional cycles: the SW Spanish Atlantic coast. *International Journal of Climatology*, 33 (9), 2142-2156.
- Rodríguez, A., Ruiz, F., Caceres, L.M., Rodríguez, J., Pino, R. and Muñoz, J.M., 2003. Analysis of the recent storm record in the south western Spanish coast: implications for littoral management. *The Science of Total Environment*, 303, 189-201.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., y Miller, T.L. (2005): Digital Shoreline Analysis System (DSAS). U.S. *Geological Survey Open-File Report* 2005: 1304 p.