

2013

Informe

La resaca marina del 21 de agosto de 2012 en las costas de Cádiz

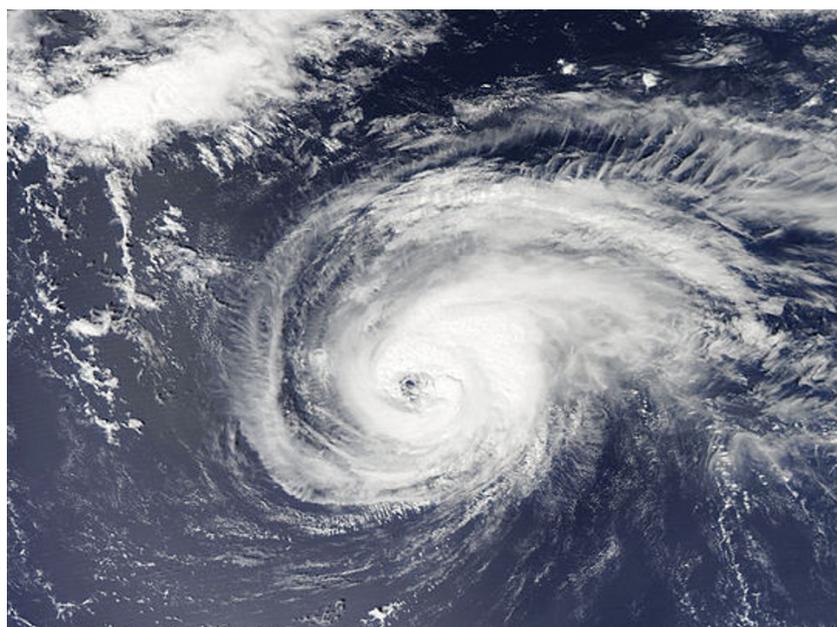


Imagen del huracán Gordon (2012).
Fuente: NASA MODIS / LANCE.

IAEM-España

Edición:

© IAEM-España, 2013. Todos los derechos reservados.

© Autores:

José Antonio Aparicio Florido (coord.)
José Manuel Calvo Hurtado
Javier Benavente González
Francisco Javier Méndez Incera
Gabriel Díaz Hernández
Enrique Álvarez Fanjul
Begoña Pérez Gómez
Marta Gómez Lahoz
Marta de Alfonso Alonso Muñoz
María Isabel Ruiz Gil de la Serna

Colaboran:



*«No fue menos terrible la [desgracia] que padeció Cádiz en los días 15 y 16 de enero de 1752: desatose un **huracán** sobre la ciudad, el cual como si quisiese vengar en su bahía la resistencia que a su empuje oponían las murallas y los edificios, apenas dejó nave que no padeciese los rigores de su ira y las iras de las olas, igualmente embravecidas.»*

Adolfo de Castro, *Historia de Cádiz* (1858)

Informe sobre la resaca marina del 21 de agosto de 2012 en las costas de Cádiz

® IAEM-España, 2013.

El martes 21 de agosto de 2012 comenzó a observarse en las playas del litoral de Cádiz una atípica acción dinámica del mar consistente en un ostensible aumento del oleaje, de las corrientes y de los niveles de marea que sorprendió a los bañistas, a los servicios de playas y al resto de servicios de emergencias.

Entre el 21 y el 22 de agosto se tuvieron que realizar numerosas actuaciones de rescate y salvamento acuático de bañistas que se vieron arrastrados aguas adentro por efecto de las corrientes, sin que estos pudieran salir a la orilla por sus propios medios. Este fenómeno fue sentido con diverso impacto a lo largo de la franja costera entre las localidades de Sanlúcar de Barrameda y Tarifa, no pareciendo percibirse en las áreas costeras más allá de la mitad sur de litoral tarifeño y del Estrecho de Gibraltar.

La Delegación española de la International Association of Emergency Managers (IAEM) impulsa el presente informe con el único fin de contribuir desde una perspectiva multidisciplinar y enfocada a la Gestión o Manejo de Emergencias (*Emergency Management*), a la explicación de las posibles causas que generaron este fenómeno y al perfeccionamiento de nuestra propia preparación ante incidentes de esta naturaleza.

Este informe es producto de un detallado estudio de campo contrastado posteriormente con un riguroso análisis científico-técnico, en el que han trabajado conjuntamente técnicos de Protección Civil, gestores de emergencias, investigadores de las Universidades de Cantabria y Cádiz, y expertos del Área de Medio Físico de Puertos del Estado.

Autores

La autoría del presente informe corresponde mancomunadamente a:

<i>José Antonio Aparicio Florido</i>	IAEM-España.
<i>José Manuel Calvo Hurtado</i>	IAEM-España.
<i>Javier Benavente González</i>	Universidad de Cádiz. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Departamento de Ciencias de la Tierra.
<i>Fernando Javier Méndez Incera</i>	Instituto de Hidráulica Ambiental «IH Cantabria».
<i>Gabriel Díaz Hernández</i>	Instituto de Hidráulica Ambiental «IH Cantabria».
<i>Enrique Álvarez Fanjul</i>	Puertos del Estado. Área de Medio Físico.
<i>Begoña Pérez Gómez</i>	Puertos del Estado. Área de Medio Físico.
<i>Marta Gómez Lahoz</i>	Puertos del Estado. Área de Medio Físico.
<i>Marta de Alfonso Alonso Muñoyerro</i>	Puertos del Estado. Área de Medio Físico.
<i>María Isabel Ruiz Gil de la Serna</i>	Puertos del Estado. Área de Medio Físico.

Colaboradores

Para su elaboración han contribuido inestimablemente con sus datos y testimonios las siguientes personas y entidades:

<i>Teodoro Barba Durán</i>	Protección Civil de Sanlúcar de Barrameda.
<i>Rodrigo Serrano Herrera</i>	Protección Civil de Tarifa.
<i>Nicolás Amaya Trujillo</i>	Protección Civil de Conil de la Frontera.
<i>José Vallejo Martínez</i>	Protección Civil de Chiclana de la Frontera.
<i>Juan Antonio Gutiérrez Ávila</i>	Protección Civil de Chiclana de la Frontera.
<i>Diego Febre Tissera</i>	Cruz Roja Española
<i>Puertos del Estado</i>	Área de Medio Físico.
<i>Universidad de Cantabria</i>	Instituto de Hidráulica Ambiental.
<i>Universidad de Cádiz</i>	Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Departamento de Ciencias de la Tierra.

Acrónimos empleados

AEMET	Agencia Española de Meteorología
BMVE	Bajamar Viva Equinoccial
CECOPAL	Centro de Coordinación de Operaciones Municipal
GDACS	Sistema Global de Coordinación y Alerta ante Desastres
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans
GIOC	Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas
GOES	Geostationary Satellite Server
IAEM	International Association of Emergency Managers
MOPLA	Morfodinámica de Playas (método)
NIVMAR	Sistema de previsión a corto plazo del nivel del mar
NHC	National Hurricane Center (EEUU)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PEM	Plan de Emergencias Municipal
REMRO	Red Española de Medida y Registro de Oleaje
REDCOS	Red Costera
REDMAR	Red de Mareógrafos
ROSPA	Royal Society for the Prevention of Accidents
SWAN	<i>Simulating Waves Nearshore</i> (método)
UTC	Tiempo Universal Coordinado

Índice

1. Introducción.....	8
2. El huracán Gordon: generación, evolución y efectos.....	9
2.1. Los ciclones tropicales del Atlántico.....	9
2.2. Gestación y desarrollo del huracán Gordon.....	10
2.3. Análisis del recorrido del huracán Gordon.....	19
2.4. Comparativa: los huracanes Bertha (2008) y Leslie (2012).....	20
2.5. Antecedentes: el «otro» huracán Gordon de 2006.....	23
3. Análisis de los efectos y daños observados.....	28
3.1. Testimonios e informes de campo.....	28
3.1.1. Informes de campo: Cádiz.....	33
3.1.2. Informes de campo: Chiclana de la Frontera.....	35
3.1.3. Informes de campo: Conil de la Frontera.....	37
3.1.4. Informes de campo: Sanlúcar de Barrameda.....	40
3.1.5. Informes de campo: Tarifa.....	40
3.1.6. Informaciones de prensa: Huelva.....	40
3.1.7. Informaciones de prensa: Portugal.....	41
3.2. Efectos del huracán Gordon sobre el oleaje, las corrientes y el nivel de mar.....	41
3.2.1. Oleaje.....	41
3.2.1.1. Descripción general.....	41
3.2.1.2. Medidas de oleaje en la zona durante el fenómeno.....	42
3.2.1.3. Análisis del oleaje durante el fenómeno, basado en mapas.....	44
3.2.1.4. Análisis espectral en el punto de la boya costera de Cádiz.....	47
3.2.2. Nivel del mar.....	48
3.2.2.1. Sistemas de medida y predicción numérica.....	48
3.2.2.2. Análisis de la evolución del nivel del mar durante el fenómeno.....	49
4. Análisis numérico del huracán Gordon y diagnóstico de sus efectos hidrodinámicos en las costas de Cádiz..	52
4.1. Datos de partida y modelos utilizados.....	53
4.1.1. Batimetría.....	54
4.1.2. Datos instrumentales de oleaje.....	54
4.1.3. Datos numéricos de viento oceánico de media resolución.....	55
4.1.4. Datos numéricos de viento de alta resolución asociado a huracanes.....	56
4.1.5. Datos numéricos de viento de alta resolución asociado a huracanes.....	58
4.2. Modelos numéricos: descripción e implementación.....	61
4.2.1. Modelo SWAN.....	61
4.2.2. Modelo MOPLA.....	63
4.3. Propagación numérica del oleaje asociado al evento de huracán Gordon 2012.....	65
4.3.1. Simulación del evento del huracán Gordon.....	66
4.3.2. Comparación del modelo SWAN con datos instrumentales.....	69
4.3.3. Análisis de la modificación espectral debida al huracán.....	73
4.4. Propagación numérica del oleaje y corrientes en la zona costera de Cádiz.....	75
4.4.1. Resultados de oleaje y corrientes.....	76
4.5. Conclusiones del análisis numérico.....	78
5. Conclusiones.....	80
Anejo 1.....	84

1. Introducción.

En la tarde del martes 21 de agosto de 2012, numerosos testigos, entre los que se encontraban varios miembros de IAEM-España, se vieron sorprendidos por una fuerte resaca marina que alcanzaba las costas de Cádiz con poderosas corrientes y olas encrespadas que arrastraban a los bañistas mar adentro, necesitando éstos la intervención de los equipos de rescate y salvamento. Se trataba de un hecho especialmente inusitado no solo por su intensidad sino también por su repentino impacto, a pesar de haberse observado durante los días previos un progresivo incremento de intensidad del oleaje que no hacía prever una situación de alerta.

El gran número de rescates realizados en un corto intervalo de tiempo levantó la voz de alarma, que posteriormente se vio justificada al conocerse que estos mismos efectos se habían sentido a lo largo de más de 80 kilómetros de costa entre las poblaciones de Sanlúcar de Barrameda y Tarifa.

Puesto que no se estaban dando en esos momentos factores meteorológicos adversos —de hecho no se habían emitido alertas de ningún tipo— y dado lo poco habitual de estos episodios, incluso suponiendo un coeficiente de marea alto y una marea viva, las sospechas llevaron a pensar en un posible evento sísmico o en la influencia del huracán Gordon, que dos días atrás se había disipado tras su paso por las Azores. Extraoficialmente se habló de «marea viva»¹, pero el análisis de sus desproporcionados efectos nos llevó a pensar a los expertos, analistas y gestores de emergencias que fue otra la génesis principal de este fenómeno, apuntando al citado huracán Gordon como el desencadenante fundamental de esta situación de emergencia.

En el presente informe se aborda un análisis técnico y exhaustivo de las consecuencias de esta resaca marina, las causas naturales que la generaron, los datos que fueron registrados por la red de mareógrafos y la modelización científica del fenómeno, así como las conclusiones a tener en cuenta a la hora de afrontar adecuadamente en el futuro un episodio de esta etiología. Queda demostrado ahora científicamente que fue el huracán Gordon el que causó las corrientes de resaca del pasado agosto de 2012; y por tanto, conociendo los factores de peligrosidad y probabilidad que rigen a los riesgos naturales, afirmamos que, al igual que Gordon, otros huracanes atlánticos podrán ocasionar en próximas temporadas de ciclones tropicales del Atlántico similares efectos sobre las costas españolas y portuguesas, de lo cual ya no queda ninguna duda a la luz de los resultados que aquí se ofrecen.

¹ *Diario de Cádiz* y *Diario de Jerez*, 22 de agosto de 2012; *Huelva Información*, 23 de agosto de 2012.

2. El huracán Gordon: generación, evolución y efectos.

2.1. Los ciclones tropicales del Atlántico.

El 1 de junio de 2012 comenzó la temporada de ciclones tropicales del Atlántico, fenómeno meteorológico especialmente vigilado por el Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos (NHC) debido a los efectos destructivos que han causado a lo largo de la historia en sus costas, en el Caribe, México y en América Central, siendo un recuerdo internacional reciente los estragos provocados por el huracán Katrina en la ciudad de Nueva Orleans en el año 2005.

Estos ciclones potencialmente catastróficos se originan por el sobrecalentamiento de la masa oceánica tropical o subtropical, cuya evaporación rápida da lugar a sistemas borrascosos de circulación giratoria en sentido contrario a las agujas del reloj y con un desplazamiento marcado por la localización geográfica en la que se gestan estas vigorosas tormentas. Primero cobran fuerza de depresión tropical con vientos máximos sostenidos de hasta 60 km/h, para convertirse en muchos casos en tormenta tropical, con vientos máximos sostenidos de entre 60 y 120 km/h, y en menor medida —por término medio— en huracanes, con vientos de más de 120 km/h. En cuanto a su desplazamiento, el rumbo que toman depende del paralelo en que se generan, de modo que se encaminan hacia el norte o al noroeste cuando se forman entre los 5° y los 30° de latitud norte (España se encuentra ubicada geográficamente entre los 35° y los 44° de latitud norte) y hacia el noreste cuando se fraguan por encima de los 30° de latitud norte.

La lista anual de nombres de ciclones tropicales del Atlántico se organiza de la «A» a la «W» siguiendo el abecedario anglosajón (sin «CH», «LL» ni «Ñ»), intercalando siempre un nombre personal masculino con un nombre femenino. Por ejemplo, la lista de 2012 para la cuenca atlántica fue: Alberto, Beryl, Chris, Debby, Ernesto, Florence, Gordon, Helene, Isaac, Joyce, Kirk, Leslie, Michael, Nadine, Oscar, Patty, Rafael, Sandy, Tony, Valerie y William. Los años pares comienzan con un nombre de hombre y los impares con un nombre de mujer².

Existen seis listas diferentes ya configuradas, una para cada año, de forma que transcurridos seis años vuelve a repetirse la primera lista. Esto quiere decir que la lista de nombres prevista para el año 2012 fue la misma que la que se empleó en el año 2006 (tabla 1).

La temporada en la que se producen estos episodios naturales extremos se inicia, como hemos dicho, cada 1 de junio y se prolonga hasta el 30 de noviembre de cada año, siendo su momento álgido los días finales de agosto y los meses de septiembre y octubre. Y en efecto, esta previsión se cumplió también en 2012, ya que hasta mediados de agosto sólo se habían

² Los ciclones tropicales del Pacífico se nombran justamente al contrario: los años pares comienzan con un nombre de mujer y los impares por un nombre con hombre. Además, la lista va en este caso de la «A» hasta la «X».

formado siete depresiones tropicales en casi tres meses (desde el 1 de junio hasta el 15 de agosto) mientras que en la segunda quincena de agosto coincidieron cinco, cuatro de las cuales alcanzaron la categoría de huracán: GORDON, ISAAC, KIRK y LESLIE.

Tabla 1. Nombres de ciclones tropicales del Atlántico para el período 2012-2017

2012	2013	2014	2015	2016	2017
Alberto	Andrea	Arthur	Ana	Alex	Arlene
Beryl	Barry	Bertha	Bill	Bonnie	Bret
Chris	Chantal	Cristobal	Claudette	Colin	Cindy
Debby	Dorian	Dolly	Danny	Danielle	Don
Ernesto	Erin	Edouard	Erika	Earl	Emily
Florence	Fernand	Fay	Fred	Fiona	Franklin
Gordon	Gabrielle	Gonzalo	Grace	Gaston	Gert
Helene	Humberto	Hanna	Henri	Hermine	Harvey
Isaac	Ingrid	Isaias	Ida	Ian	Irma
Joyce	Jerry	Josephine	Joaquin	Julia	Jose
Kirk	Karen	Kyle	Kate	Karl	Katia
Leslie	Lorenzo	Laura	Larry	Lisa	Lee
Michael	Melissa	Marco	Mindy	Matthew	Maria
Nadine	Nestor	Nana	Nicholas	Nicole	Nate
Oscar	Olga	Omar	Odette	Otto	Ophelia
Patty	Pablo	Paulette	Peter	Paula	Philippe
Rafael	Rebekah	Rene	Rose	Richard	Rina
Sandy	Sebastien	Sally	Sam	Shary	Sean
Tony	Tanya	Teddy	Teresa	Tobias	Tammy
Valerie	Van	Vicky	Victor	Virginie	Vince
William	Wendy	Wilfred	Wanda	Walter	Whitney

2.2. Gestación y desarrollo del huracán Gordon.

Al anochecer del miércoles 15 de agosto de 2012, dos meses y medio después del inicio de la temporada de ciclones tropicales del Atlántico, el Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos observó la formación de la octava depresión tropical precisamente al filo de los 30° N —coordenadas exactas 29,9° N 55,1° W— y a 960 km al este-sureste de las islas Bermudas, con una trayectoria inicial hacia el norte y previsión de giro prematuro hacia el noreste y este-noreste, adentrándose en el Atlántico central (imagen 1).

Se descartaba entonces el peligro para las áreas próximas al continente americano, pero se recomendaba su monitorización en la trayectoria de las islas Azores, máxime tras su tránsito a tormenta tropical, que tuvo lugar al día siguiente y por lo que adquirió el nombre de GORDON³. Al final del jueves 16, hacia las 21:00 UTC (tiempo universal), Gordon ya transitaba por encima de los 34° N con vientos máximos de 110 km/h y pronto a convertirse en huracán (imagen 2).

³ Los ciclones tropicales reciben su nombre cuando pasan de depresión tropical a tormenta tropical.

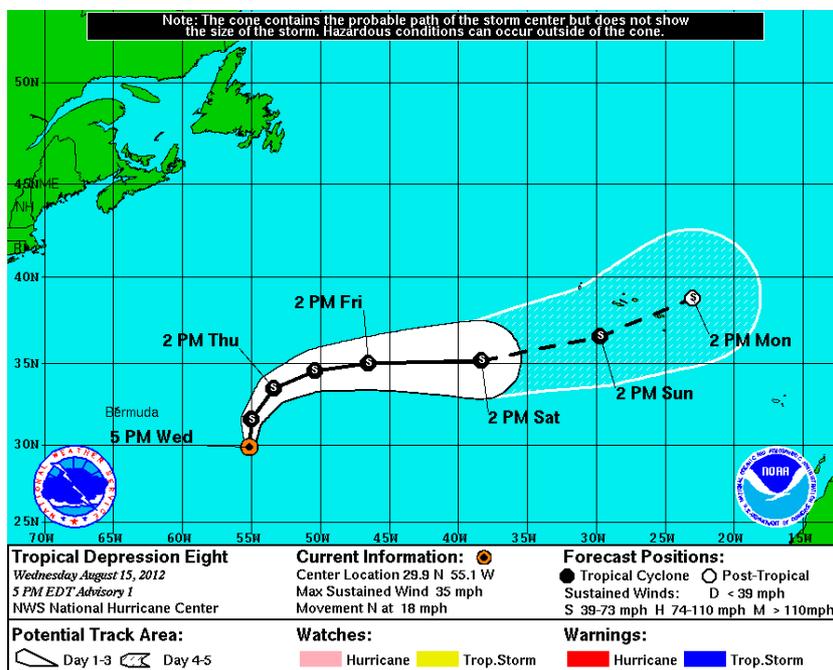


Imagen 1. Gordon se forma en la intersección de los 30° N y los 55° W, con trayectoria inicial hacia el norte y previsión de giro prematuro hacia el noreste. Fuente: NHC.

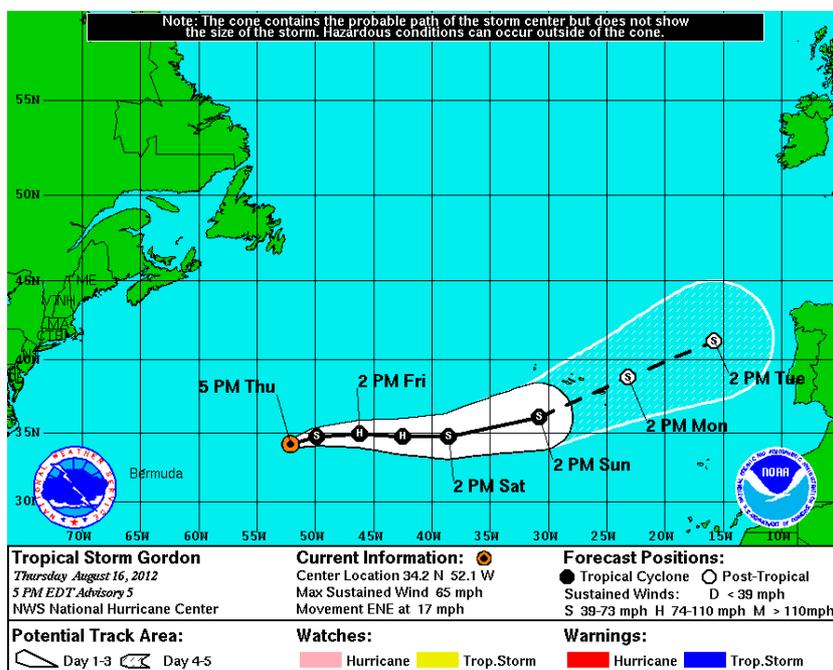


Imagen 2. A las 21:00 UTC del jueves 16, Gordon se alinea con el paralelo 34° N y, como tormenta tropical, aumenta rápidamente la intensidad de sus vientos. Fuente: NHC.

El viernes 17 de agosto Gordon se resistía a convertirse en huracán, fluctuando entre los 100-110 km/h. Ese día se hallaba situado a 1.420 km al oeste-suroeste de las Azores y había fijado su rumbo claramente hacia el este, avanzando a una velocidad de 30 km/h, lo que permitía calcular que de llegar a los 30° W el tránsito a huracán se produciría entre el domingo 19 y el lunes 21 de agosto. Con estos datos, el NHC emitió una alerta de vigilancia para las Azores centrales y orientales (imagen 3).

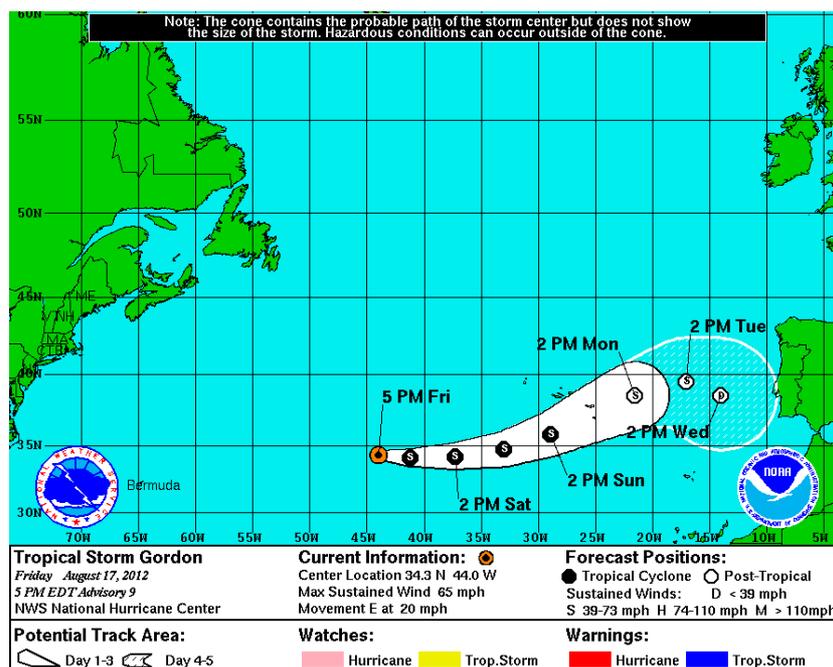


Imagen 3. A las 21:00 UTC del viernes 17, la tormenta tropical Gordon se resiste a convertirse en huracán. Obsérvese la proximidad de impacto prevista en ese momento contra las altas presiones reinantes en la Península Ibérica, en forma ya de depresión post-tropical. Fuente: NHC.

El sábado 18 Gordon no solo alcanzó por fin la categoría de huracán 1 en la escala de Saffir-Simpson —adelantándose considerablemente a las predicciones del día anterior—, sino que incrementó prodigiosamente su fuerza hasta huracán de categoría 2, con vientos máximos sostenidos de 175 km/h. Su trayectoria no se había apartado de los 34° N y dirección este, en línea recta hacia el norte de Marruecos y el Estrecho de Gibraltar, y los pronosticadores daban por hecho que llegaría con fuerza de huracán un poco más debilitado hasta la perpendicular de las Azores (imagen 4). Al finalizar el sábado, los vientos con fuerza de huracán se extendían desde su ojo hasta 55 km de radio y con fuerza de tormenta tropical hasta los 205 km de radio. Bajo estas condiciones, los efectos sobre la mar no dejaban lugar a dudas, anunciándose oficialmente marejadas peligrosas y resaca para gran parte de las islas Azores (imagen 5).

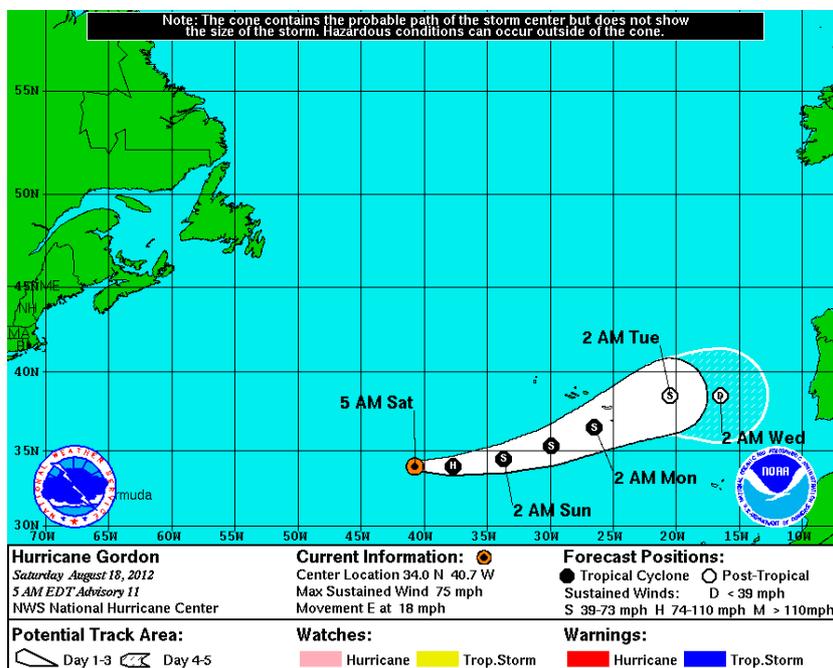


Imagen 4. A las 09:00 UTC del 18 de agosto, Gordon ya es huracán de categoría 1 en tránsito hacia la fase de categoría 2. La conversión de tormenta tropical en huracán se adelanta casi en diez grados de longitud sobre las predicciones iniciales, formándose sobre las coordenadas 40,7° W. Fuente: NHC.

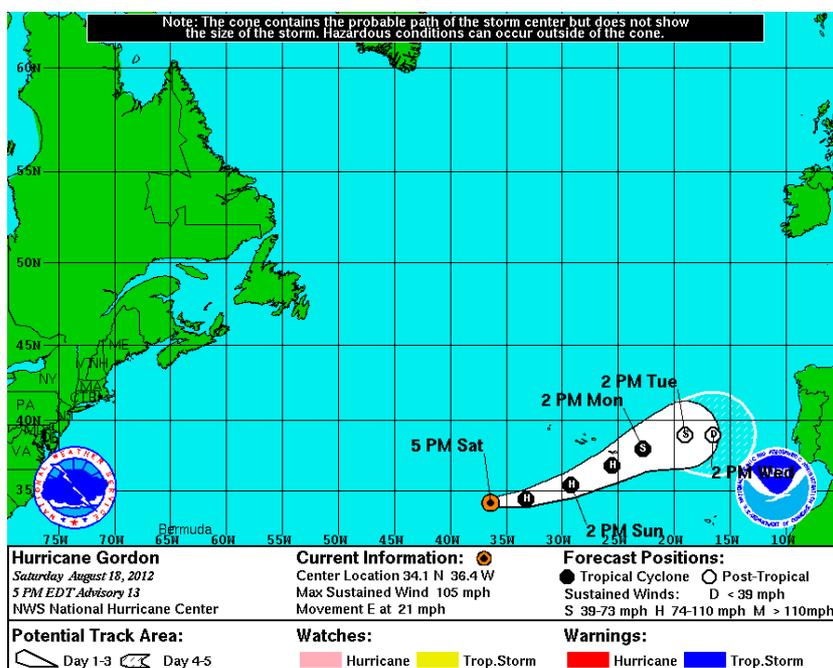


Imagen 5. A las 21:00 UTC del 18 de agosto la fase de huracán se pronostica hasta alcanzar la perpendicular de las Azores, emitiéndose avisos de marejadas ciclónicas y resaca para las costas. Fuente: NHC.

Como habían anunciado los partes meteorológicos del NHC, el domingo día 19 el huracán Gordon se debilitó a categoría 1 (imagen 6), desviando ligeramente su rumbo hacia el este-noreste y posicionándose en una latitud más arriba, justamente en los 36,7° N, es decir, a la altura del Golfo de Cádiz en paralelo con el Ecuador.

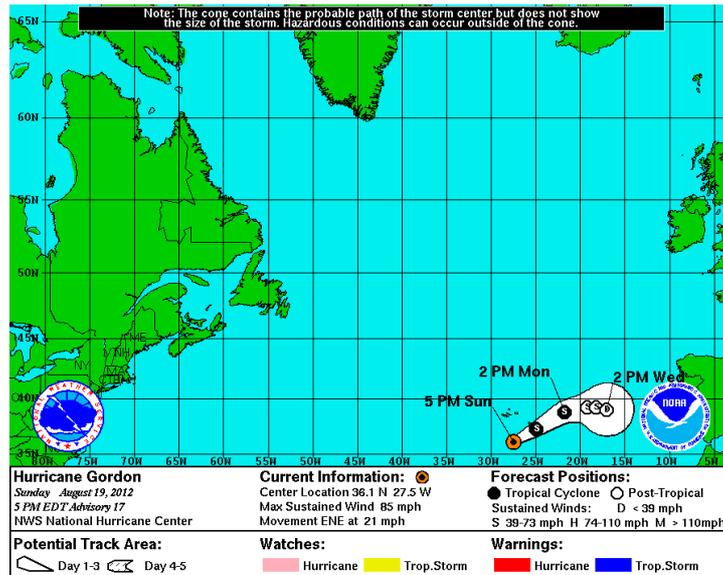


Imagen 6. A las 21:00 UTC del 19 de agosto, Gordon se situaba con fuerza de huracán de categoría 1 en los 36,7° N y movimiento ya hacia el este-noreste. Fuente: NHC.

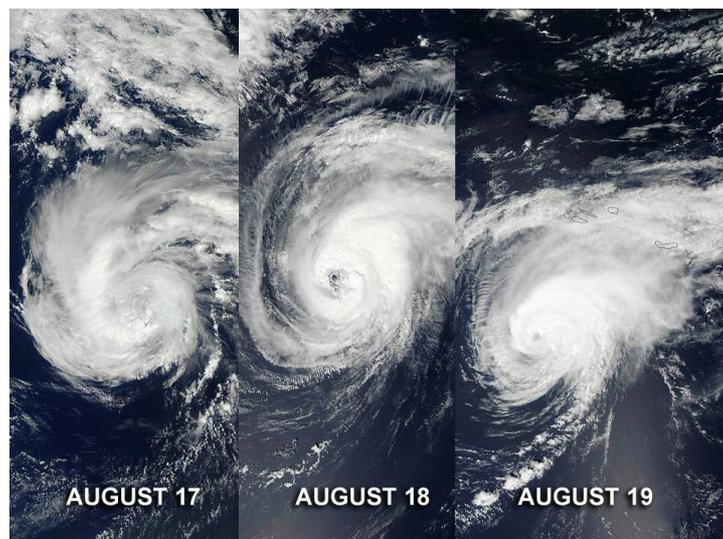


Imagen 7. Aspecto del huracán Gordon durante los días 17, 18 y 19 de agosto. En la imagen central (día 18) Gordon alcanzó la categoría 2, observándose claramente el ojo central sobre el que gira la borrasca. Fuente: NASA.

En las mismas condiciones de intensidad, rumbo y peligrosidad se mantuvo durante la primera mitad del lunes día 20, cuando el huracán se encontraba posicionado a 65 km al sureste de la isla de San Miguel y a 30 km al norte de la isla de Santa Margarita, donde se registraron vientos con una velocidad media de 76 km/h y rachas de 113 km/h. Desde el NHC se hacía un llamamiento para la protección de la vida y las propiedades en las Azores, aun cuando la tendencia del huracán era a debilitarse en uno o dos días. Tanto fue así que a partir de las 15:00 UTC del mismo lunes Gordon perdió sus características de huracán para retornar de nuevo a tormenta tropical o post-tropical con vientos máximos sostenidos de 110 km/h (imagen 8). A esa hora su vórtice se hallaba situado en las coordenadas 38,3° N y 22,3° W, a 410 km al este de las Azores.

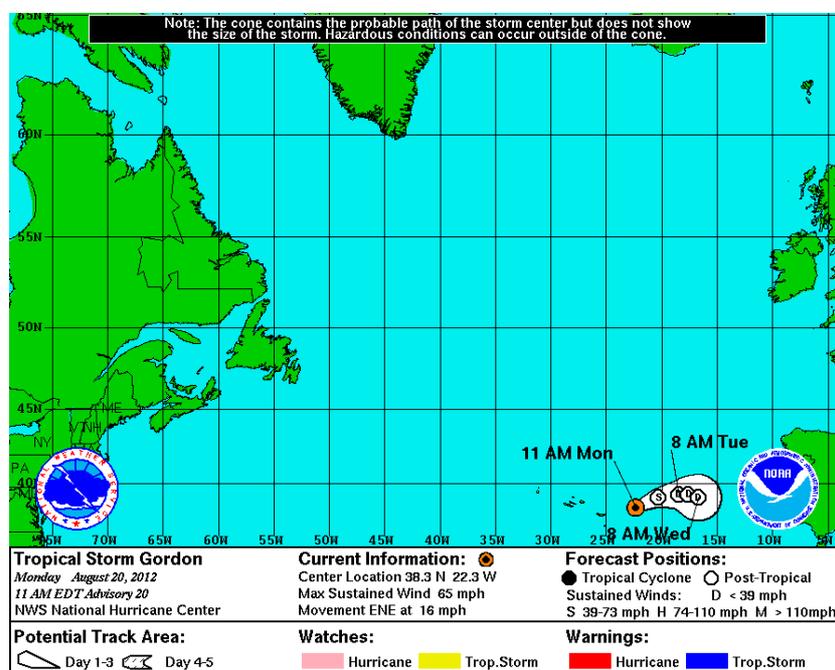


Imagen 8. A las 15:00 UTC del lunes 20 de agosto, Gordon se reconvierte en tormenta tropical con vientos máximos sostenidos de 110 km/h a una distancia de unos 1.300 km al oeste-noroeste del Golfo de Cádiz. Fuente: NHC.

Con estos datos y tras pasadas las Azores en dirección ahora hacia la Península Ibérica, el Gobierno de Portugal discontinuó los avisos de alerta para esta área, recomendándose por parte del NHC atender a los boletines emitidos por los servicios meteorológicos nacionales en la dirección de la borrasca, es decir, Portugal y España.

El último aviso emitido por el NHC tuvo lugar el martes 21, cuando Gordon era ya una tormenta post-tropical, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h, disipándose al colisionar con las altas presiones asentadas sobre la Península Ibérica (imagen 9).

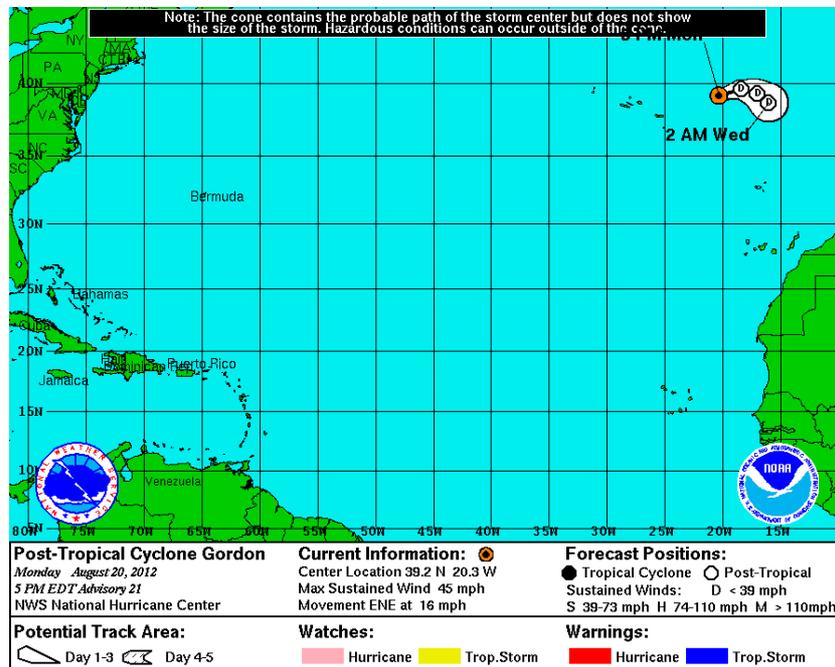


Imagen 9. A las 21:00 UTC del lunes 20 de agosto, Gordon comienza a disiparse al oeste de las Azores como depresión post-tropical, a 1.000 km al oeste-noroeste del Cabo de San Vicente. Fuente: NHC.

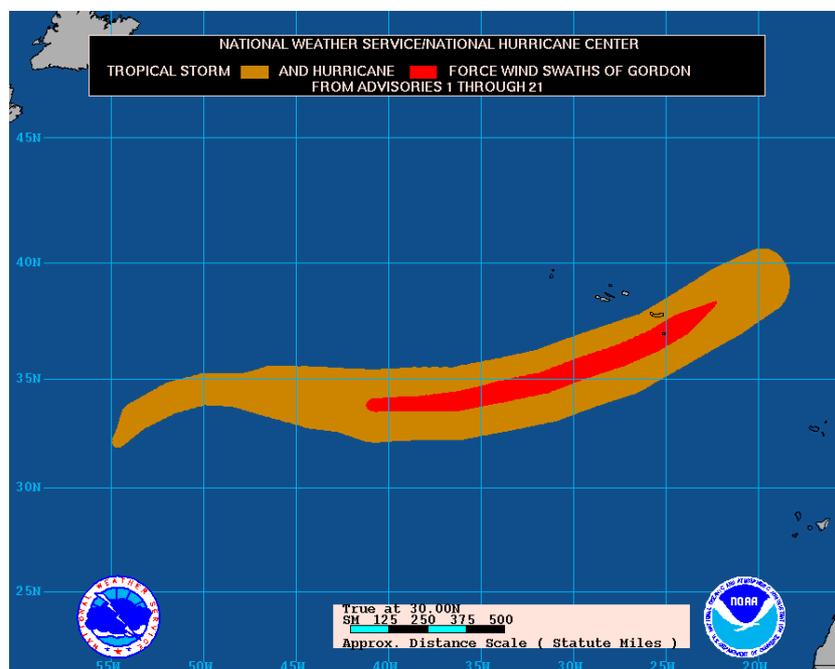


Imagen 10. Ruta trazada por el huracán Gordon desde su génesis hasta su disipación. Fuente: NHC.

Tabla 2. Evolución del huracán Gordon.

Interpretación de la tabla:

- (1) TD = Depresión tropical; TS = Tormenta Tropical; H = Huracán (la categoría se indica por el número que anotamos a continuación); PTD = Depresión post-tropical.
- (2) Vientos máximos sostenidos.
- (3) Dirección de desplazamiento.
- (4) Velocidad de desplazamiento.

Fecha	Hora	Fase ⁽¹⁾	Lat.	Long.	VMS ⁽²⁾	Posición	Dir. ⁽³⁾	Desp. ⁽⁴⁾
15-08-2012	21:00	TD	29,9° N	55,1° W	55 km/h	960 km al ESE de Bermudas	N	30 km/h
16-08-2012	03:00	TD	31,3° N	55,5° W	55 km/h	885 km al E de Bermudas	NNW	28 km/h
16-08-2012	09:00	TS	32,2° N	54,8° W	65 km/h	940 km al E de Bermudas	NNE	22 km/h
16-08-2012	15:00	TS	33,3° N	53,8° W	85 km/h	1,035 km al E de Bermudas	NE	26 km/h
16-08-2012	21:00	TS	34,2° N	52,1° W	100 km/h	2.285 al W de las Azores	ENE	28 km/h
17-08-2012	03:00	TS	34,6° N	50,3° W	110 km/h	2.115 al W de las Azores	E	28 km/h
17-08-2012	09:00	TS	34,6° N	48,1° W	100 km/h	1.925 al W de las Azores	E	30 km/h
17-08-2012	15:00	TS	34,5° N	46,3° W	100 km/h	1.770 al W de las Azores	E	30 km/h
17-08-2012	21:00	TS	34,3° N	44,0° W	100 km/h	1.580 al W de las Azores	E	32 km/h
18-08-2012	00:00	TS	34,3° N	43,0° W	100 km/h	1.395 al WSW de las Azores ⁴	E	32 km/h
18-08-2012	03:00	TS	34,2° N	42,1° W	110 km/h	1.420 al WSW de las Azores	E	30 km/h
18-08-2012	06:00	TS	34,0° N	41,5° W	110 km/h	1.375 al WSW de las Azores	E	27 km/h
18-08-2012	09:00	H1	34,0° N	40,7° W	120 km/h	1.310 al WSW de las Azores	E	30 km/h
18-08-2012	12:00	H1	33,9° N	39,6° W	130 km/h	1.220 al WSW de las Azores	E	30 km/h
18-08-2012	15:00	H1	34,1° N	38,6° W	130 km/h	1.130 al WSW de las Azores	E	30 km/h
18-08-2012	18:00	H1	34,0° N	37,7° W	130 km/h	1.060 al WSW de las Azores	E	30 km/h
18-08-2012	21:00	H2	34,1° N	36,4° W	165 km/h	950 al WSW de las Azores	E	33 km/h
19-08-2012	00:00	H2	34,3° N	35,2° W	175 km/h	845 al WSW de las Azores	E	33 km/h
19-08-2012	03:00	H2	34,5° N	33,9° W	175 km/h	730 al WSW de las Azores	E	35 km/h
19-08-2012	06:00	H2	34,6° N	32,7° W	175 km/h	635 al WSW de las Azores	E	35 km/h
19-08-2012	09:00	H2	34,9° N	31,6° W	165 km/h	630 al WSW de I. San Miguel	E	37 km/h
19-08-2012	12:00	H2	35,1° N	30,7° W	155 km/h	550 al WSW de I. San Miguel	E	37 km/h
19-08-2012	15:00	H2	35,5° N	29,7° W	160 km/h	450 al WSW de I. San Miguel	ENE	33 km/h
19-08-2012	18:00	H1	35,8° N	28,7° W	150 km/h	360 al WSW de I. San Miguel	ENE	33 km/h
19-08-2012	21:00	H1	36,1° N	27,5° W	140 km/h	255 al SW de I. San Miguel	ENE	33 km/h
20-08-2012	00:00	H1	36,4° N	26,5° W	140 km/h	175 al SSW de I. San Miguel	ENE	33 km/h
20-08-2012	03:00	H1	36,7° N	25,8° W	130 km/h	70 km al ENE de I. Santa Margarita	ENE	32 km/h
20-08-2012	06:00	H1	37,3° N	25,2° W	120 km/h	65 km al SE de I. San Miguel	ENE	32 km/h
20-08-2012	06:30 ⁵	H1	37,1° N	25,0° W	120 km/h	15 km al NE de I. Santa	ENE	32 km/h

⁴ Posible error del pronosticador. La posición correcta en función de la velocidad y dirección del ciclón debía ser 1.484 km al WSW de las Azores.

⁵ Actualización del boletín de las 06:00.

Fecha	Hora	Fase ⁽¹⁾	Lat.	Long.	VMS ⁽²⁾	Posición	Dir. ⁽³⁾	Desp. ⁽⁴⁾
						Margarita		
20-08-2012	09:00	H1	37,4° N	25,2° W	120 km/h	80 km al E de I. Santa Margarita	ENE	24 km/h
20-08-2012	12:00	TS	37,7° N	23,2° W	110 km/h	180 km al ENE de I. Santa Margarita	ENE	24 km/h
20-08-2012	15:00	TS	38,3° N	22,3° W	100 km/h	410 km al E de las Azores	ENE	26 km/h
20-08-2012	21:00	PTD	39,2° N	20,3° W	75 km/h	595 km al ENE de las Azores	ENE	26 km/h

2.3. Análisis del recorrido del huracán Gordon.

De los datos recogidos en el apartado anterior podemos concluir que desde el jueves 16 hasta el lunes 20 de agosto, el huracán Gordon estuvo circulando paralelo al Ecuador en línea ligeramente curvada y en dirección este durante 2.550 km entre los 34° N y los 37° N. Cabe suponer —lo que quedará demostrado en los capítulos siguientes— que la fuerza de los vientos, por encima de los 120 km/h en la última parte de su recorrido, estuvo levantando olas de gran altura y generando corrientes marinas en la dirección de desplazamiento del huracán, es decir, hacia el este. En esta dirección y entre los paralelos mencionados se encuentran las Islas Canarias, el norte de Marruecos, el Estrecho de Gibraltar, el Golfo de Cádiz, el Algarve portugués y el Cabo de San Vicente. Es lógico deducir además que a mayor distancia lineal de recorrido, mayor es el *fetch* (zona de trasvase energético entre atmósfera, viento y superficie del mar) y por tanto mayor altura y período tendrá el oleaje. Se denomina *fetch* a la longitud total de la superficie marina recorrida por un viento en una dirección y a una velocidad prácticamente constante o uniforme, durante la cual levanta trenes de olas cuya altura y distancia entre una y otra (período) depende de la intensidad y duración del viento. Esto generó en el caso del Golfo de Cádiz oleajes con períodos superiores a 14 segundos.

A lo anterior se añade el hecho de que los índices más altos de cualquier marejada ciclónica se registran en el cuadrante delantero derecho de esa gran espiral tormentosa que forma el ciclón⁶. Llamamos marejada ciclónica o marea meteorológica al fenómeno que se produce sobre la superficie del mar al paso de un ciclón, mediante el cual los fuertes vientos sostenidos reinantes, unidos a las bajas presiones, elevan anormalmente el nivel del mar. Esta perturbación se desplaza en la misma dirección de la borrasca y a una velocidad proporcional a su velocidad de desplazamiento. A mayor velocidad sostenida del viento y menor presión atmosférica, mayor elevación del mar, y a mayor velocidad de desplazamiento del ciclón, mayor impulso del tren de olas. Uniendo todo esto y aplicándolo al huracán Gordon, podemos afirmar que en su trayectoria predominante hacia el este y tras su cambio de rumbo final oscilante entre los 34° N y los 37° N, el huracán provocó un fuerte mar de fondo que se desplazó hacia las costas meridionales españolas. Sin embargo, hay que destacar que los efectos de sobre elevación del nivel del mar debido a la marea meteorológica solo se hacen

⁶ NOAA, FEMA y Cruz Roja Americana: «Ciclones tropicales: guía de preparación». Departamento de Comercio de los Estados Unidos, Agencia Nacional del Océano y la Atmósfera, Servicio Nacional de Meteorología, texto revisado en junio de 2012.

patentes si se generan en zonas someras. Dicha marea hubiera tenido efecto si la baja presión hubiera llegado al propio Golfo de Cádiz.

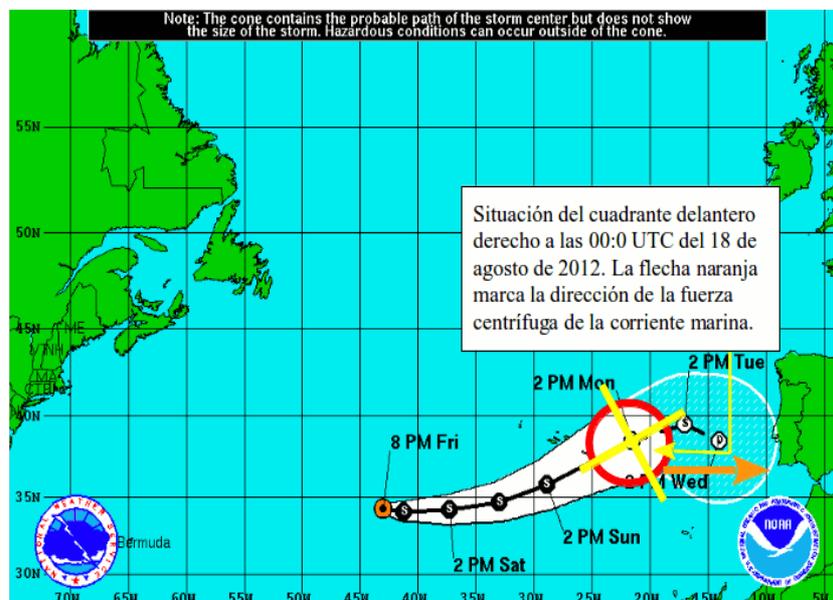


Imagen 11. Gráfico elaborado por IAEM-España en el que se marca el hipotético desplazamiento de la corriente marina impulsada por la fuerza centrífuga del huracán desde su cuadrante delantero derecho. Fuente: NHC (las marcas y flechas han sido añadidas por IAEM-España).

2.4. Comparativa: los huracanes Bertha (2008) y Leslie (2012).

Esta hipótesis no solo está formulada en base a conocimientos teóricos, sino también sobre hechos históricos. En 2008, el huracán Bertha produjo una gran marejada ciclónica cuyo oleaje alcanzó las costas de Nueva Jersey, Maryland, Virginia, Carolina del Norte y Delaware, a pesar de que el huracán rehuyó la tierra firme cuando estaba aún a unos 1.300 km al suroeste de las costas continentales americanas. Tanto es así que en estas playas el tiempo estaba soleado y soplabla una brisa suave⁷.

Bertha, un huracán de categoría 3, fue uno de los más longevos de la historia, ya que tras generarse el jueves 3 de julio de 2008 al suroeste de las islas de Cabo Verde se disipó en las aguas del Atlántico norte diecisiete días después, es decir, el domingo 20 de julio, tras un recorrido superior a los 8.500 km durante el cual atravesó por encima de las Bermudas. Su efecto de resaca, que provocó una crecida del mar de entre 30 y 150 cm desde Florida hasta Nueva Inglaterra, con especial incidencia en Carolina del Norte, dejó dos muertos y un

⁷ Wallendorf, Jones, Ewing y Battalio: *Solutions to Coastal Disasters 2011*, pág. 133, American Society of Civil Engineers.

desaparecido en las playas de Nueva Jersey⁸: uno de los fallecidos por posible infarto durante su rescate y el segundo por ahogamiento. El tercer cuerpo jamás fue encontrado. El fenómeno obligó a efectuar unos 1.500 rescates en Maryland y dejó 55 heridos en Delaware y otros 4 en Carolina del Norte.

Igual que hallamos en Bertha un precedente de Gordon, también tenemos réplicas incluso posteriores a éste. El huracán Gordon no es el único de la temporada 2012 que generó corrientes de resaca en las costas de la cuenca atlántica, aunque sí es el único que afectó a las costas españolas. Leslie también generó una marejada ciclónica que afectó a las costas norteamericanas en la primera semana de septiembre, dos semanas después de su precursor Gordon.

El huracán Leslie se formó a las 15:00 UTC del 31 de agosto a 1.905 km al este de las islas Windward, tomando primero rumbo hacia el oeste y luego paulatinamente hacia el oeste-noroeste y noroeste, enfilando la costa este de los Estados Unidos por encima de la Península de Florida. Al alcanzar la latitud 26° N, Leslie, convertido ya en huracán de categoría 1, se frenó y modificó su ruta hacia el norte, rozando las Bermudas por su lado izquierdo y girándose luego hacia el nor-noreste hacia las aguas del Atlántico norte. El punto de mayor acercamiento del huracán a las costas norteamericanas fue el meridiano 65° W, quedándose a unos 1.300 km de distancia. Sin embargo, y a pesar de que no llegó a alcanzar la categoría 2, la marejada ciclónica impulsada hacia el continente provocó el día 7 de septiembre y siguientes una alerta roja por resaca marina costera para los estados de Maryland, Delaware y Nueva Jersey, todo ello con tiempo soleado y vientos no superiores a los 32 km/h (imágenes 12 y 13).

Las cifras no oficiales manejadas por IAEM-España indican que Leslie obligó a rescatar a 4 bañistas en las playas de Seaside Heights (Nueva Jersey) en dos incidentes distintos. Dos de ellos, unos jóvenes de 18 y 21 años, fueron arrastrados 140 m hacia dentro entre olas de casi 2 m de altura. Los otros dos, de 28 y 30 años, lograron salir por sí mismos sin ayuda de los rescatadores⁹.

⁸ Otras fuentes no oficiales señalan que el número de muertos se elevó a 7 desde Coney Island hasta los Hamptons.

⁹ Información del New Jersey 101.5 FM Radio publicada el 10 de septiembre de 2012.

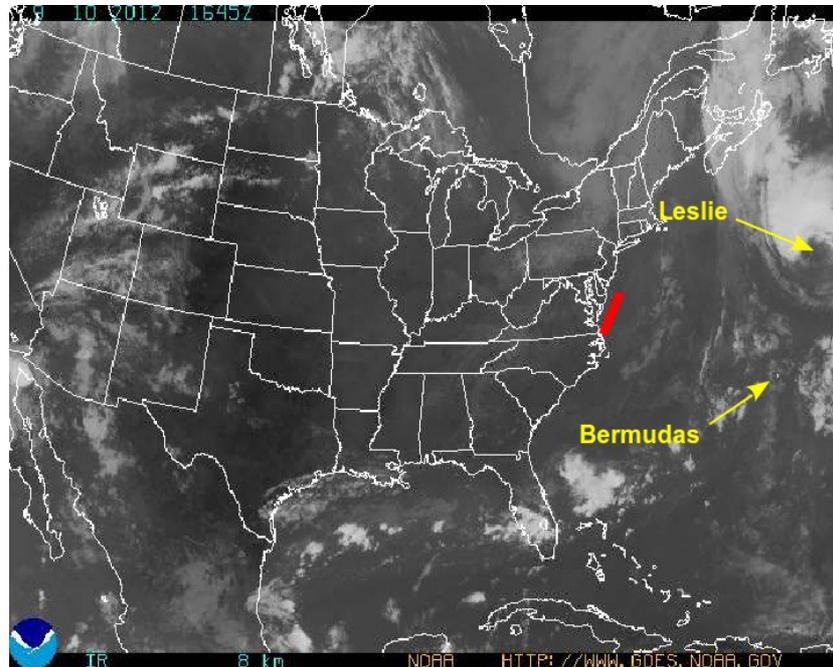


Imagen 12. Imagen del Geostationary Satellite Server (GOES) a las 16:45 UTC del 10 de septiembre de 2012, donde se muestra la ubicación del ojo de Leslie dirigiéndose hacia el Atlántico norte. En esa fecha todavía se encontraban activas las alertas del NOAA por resaca marina en las costas de Maryland, Delaware y Nueva Jersey. Fuente: NOAA.

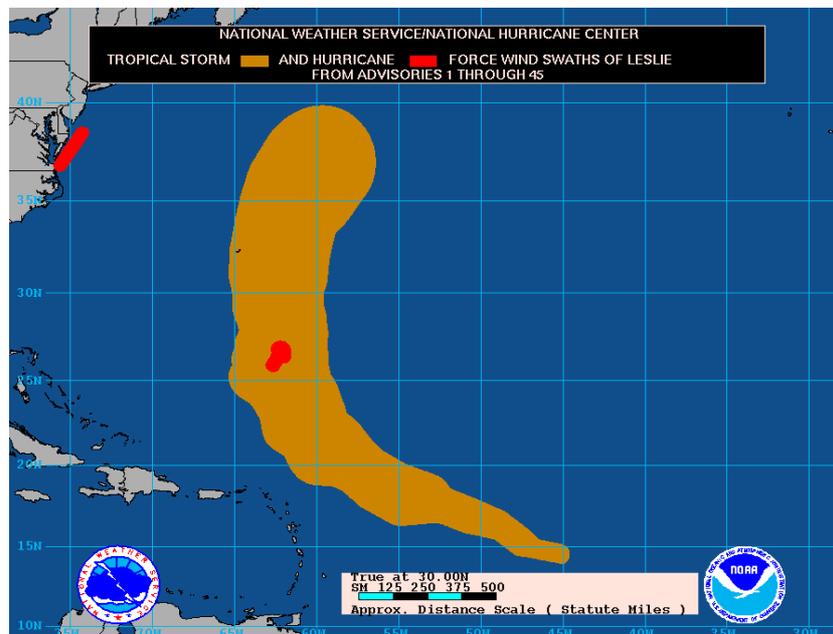


Imagen 13. Recorrido del huracán Leslie. La marca roja indica la zona de impacto real de la marejada ciclónica. Fuente: NHC.

2.5. Antecedentes: el «otro» huracán Gordon de 2006.

Siguiendo la clasificación nominal de los ciclones tropicales del Atlántico, en 2006 se formó «otro» huracán llamado Gordon que, para mayor casualidad, tomó también rumbo este en dirección hacia la Península Ibérica, convirtiéndose en una especie de «hermano gemelo» del Gordon de 2012. Sin embargo existen notables diferencias entre el Gordon de 2006 y el de 2012.

El huracán Gordon de 2006 se formó primero como depresión tropical —séptima de la temporada— a las 03:00 UTC del 11 de septiembre en las coordenadas 20,2° N y 54,5° W, a unos 845 km al este-noreste de las islas Leeward. Las predicciones iniciales ya apuntaban a que la ruta que trazaría en su recorrido evitaría la cuenca interior del Caribe, dirigiéndose hacia las Bermudas y moviéndose hacia el oeste, con un giro lento hacia el noroeste. Era la dirección «normal», ya que se había formado por debajo de los 30° N.

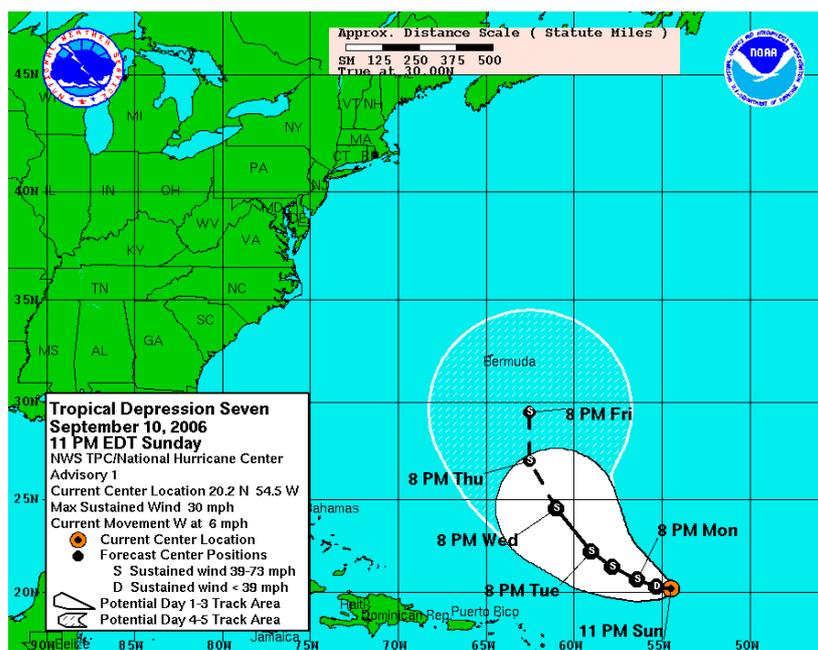


Imagen 14. Génesis del huracán Gordon (2006). Fuente: NHC.

Ese mismo día 11 pasó a convertirse en tormenta tropical —momento en el que recibió el nombre de Gordon—, aumentando a la categoría de huracán en las primeras horas de la madrugada del día 13. La dirección de desplazamiento comienza a girar entonces primero hacia el norte y luego al noreste, siguiendo las predicciones iniciales del NHC, lo que hace que a las 21:00 UTC del jueves día 14 el huracán se sitúe en la latitud 30,2° N con vientos máximos sostenidos de 195 km/h, convertido en huracán mayor de categoría 3 en la escala de Saffir-Simpson. Sin embargo, veinticuatro horas después Gordon apenas se mueve, se frena en los 31,3° N, reduciendo su fuerza a huracán de categoría 1 en situación casi estacionaria.

Las aguas más frías del Atlántico norte y central hacen que el día 16 Gordon reconsidere su ruta, sorteando estas aguas situadas a la derecha de su viaje y girando su frente nuevamente hacia el nor-noroeste y poco después otra vez hacia el norte (imagen 15). Parece como si, tras su breve pausa poco más arriba de los 30° N, Gordon renaciera como huracán; pero esta vez se encontraba por encima de la latitud en la que los ciclones tropicales tienden hacia el este o noreste. Y en efecto, a las 21:00 UTC del domingo día 17 el huracán Gordon ya se dirigía claramente hacia el nor-noreste a una velocidad de desplazamiento de 22 km/h y vientos máximos sostenidos de 130 km/h (categoría 1).

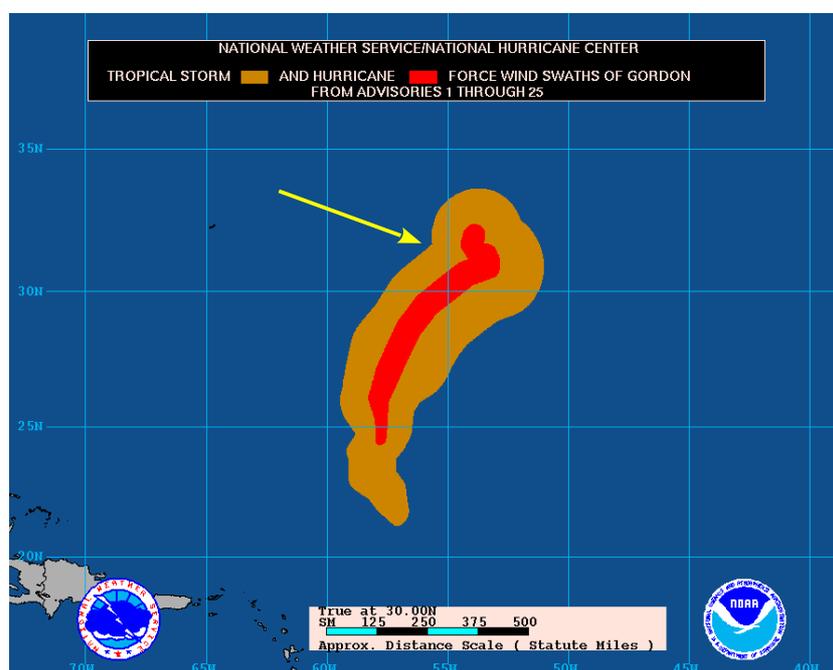


Imagen 15. Entre el 15 y el 16 de septiembre el huracán Gordon se frena y reconsidera su trayectoria para sortear las aguas frías del Atlántico central. La flecha amarilla señala una ligera protuberancia en el frente del huracán que es el inicio de la nueva trayectoria. Fuente: NHC.

El lunes día 18 continúa girando rápidamente, primero hacia el noreste, luego al este-noreste y finalmente hacia el este, situándose al anochecer en los 38° N a 1.415 km al oeste de la isla Terceira, en las Azores (imagen 17). A las 06:00 UTC ya es de nuevo un huracán de categoría 2 a 1.140 km de Terceira, al tiempo que acelera vertiginosamente su velocidad de desplazamiento hasta los 44 km/h.



Imagen 16. Hucarán Gordon (2006) visto desde el transbordador espacial Space Shuttle Atlantis. Fuente: Space Shuttle Atlantis STS-115.

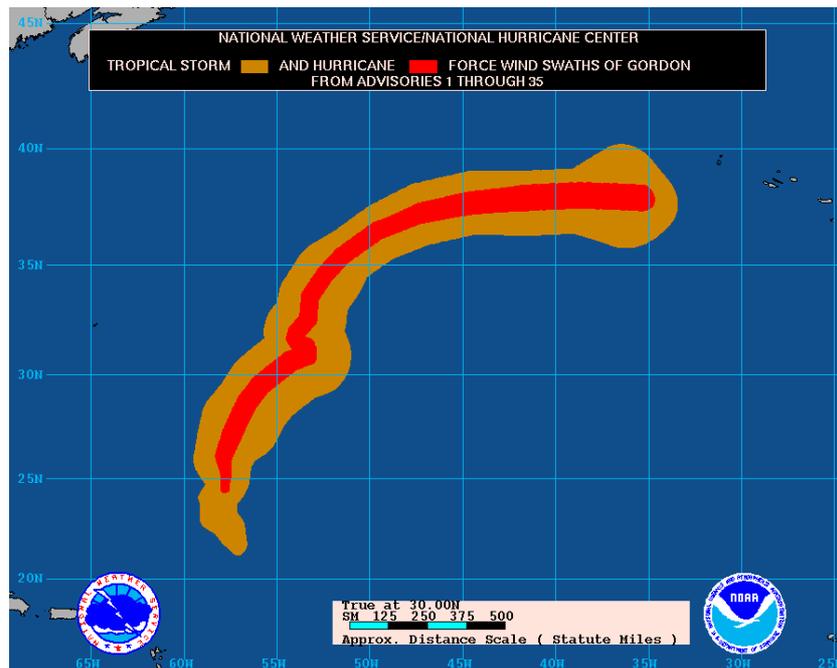


Imagen 17. El día 18 se refuerza como huracán de categoría 2 y fija su trayectoria hacia el este en el paralelo 38° N. Su diferencia de 4° por encima de la trayectoria del Gordon de 2012 es la que marcará a la postre sus efectos sobre las distintas costas españolas. Fuente: NHC.

A las 09:00 UTC del miércoles día 20, Gordon continúa siendo un huracán de categoría 1, sin salirse de su latitud 38° N y manteniendo el rumbo hacia el este, pero acelerando su velocidad de desplazamiento hasta los 56 km/h. Ese mismo día atraviesa las

Azores y se sitúa a 625 km al oeste de Lisboa, donde pierde su fuerza de huracán y comienza a disiparse en forma de tormenta post-tropical. Su giro final hacia el noreste con respecto a su trayectoria previamente mantenida en los 38° N hizo que el Gordon de 2006 se alejara en esta ocasión del Golfo de Cádiz, dirigiéndose hacia las costas de Galicia, si bien en este caso la cercanía a las costas gallegas hicieron sentir también la marea meteorológica además del oleaje.

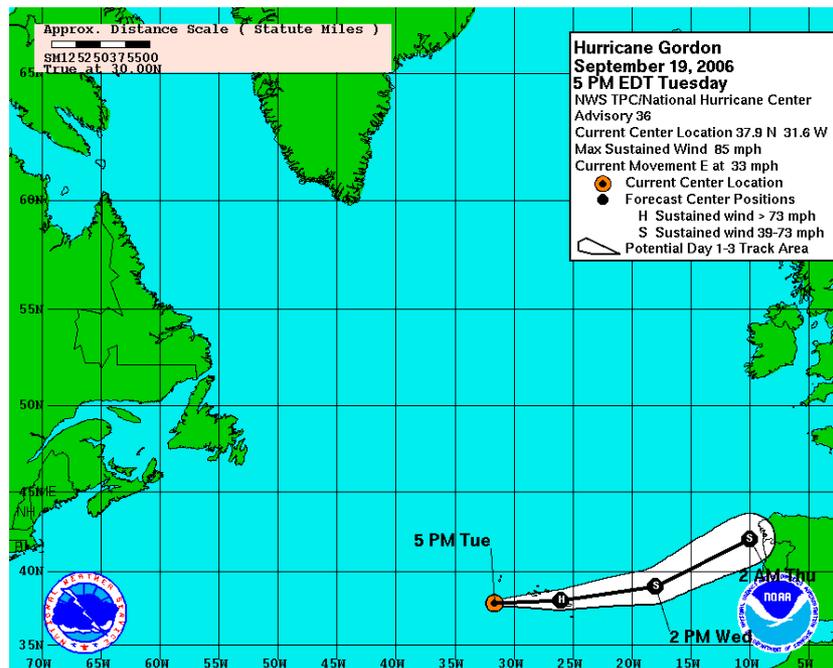


Imagen 18. Las predicciones del Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos vaticinaban el día 19 que el huracán Gordon (2006) impactaría sobre las costas de Galicia. Su trayectoria al filo de los 38° N permitió que su rotación final hacia el noreste esquivara el Golfo de Cádiz. Fuente: NHC.



Imagen 19. Daños provocados por la tormenta post-tropical Gordon en una calle de Galicia. Fuente: Wikimedia Commons.



Imagen 20. Gordon y Helene se cruzan en 2006 por las aguas centrales del Atlántico. Helene (abajo) se dirige hacia el noroeste, mientras que Gordon (arriba) se encamina ya hacia las Azores, en dirección este.
Fuente: NASA/GSFC, MODIS Rapid Response.

3. Análisis de los efectos y daños observados.

3.1. Testimonios e informes de campo.

Los efectos de la resaca marina objeto del presente estudio fueron percibidos a lo largo del litoral gaditano entre Sanlúcar de Barrameda y Tarifa durante los días 21 y 22 de agosto de 2012, tras los cuales se regresó a la normalidad en todas las áreas costeras afectadas. De cuantos municipios gaditanos limitan con el Atlántico, ninguno quedó exento de este fenómeno extraordinario, teniendo en cuenta que nuestra consideración de «extraordinario» se refiere a la época del año en la que se produce y las condiciones meteorológicas que lo generan.

Prácticamente todos los usuarios y servicios de playas, incluyendo los servicios locales de Protección Civil, Policía Local y Cruz Roja, observaron cómo el día 21 de agosto a partir de las 10:00 UTC comenzó un fuerte oleaje fuera de lo normal coincidente con un mar de aspecto espumoso en una franja de 100-200 m desde la orilla hacia adentro sin que se dieran condiciones meteorológicas para ello. El viento era de componente variable tendiendo a oeste, con brisas en el litoral y levante flojo en el Estrecho de Gibraltar, con cielos completamente despejados. El boletín emitido por la Agencia Española de Meteorología (AEMET) a las 07:30 UTC del martes 21 de agosto descartaba la presencia de fenómenos costeros, por lo que todas las playas amanecieron con bandera de color verde. Sin embargo, la inesperada marejada incrementó súbitamente la actividad de los rescatadores ante la presencia de numerosos bañistas y practicantes de surf que evidenciaban su imposibilidad de salir a la orilla por medios propios. Esto obligó a izar la bandera amarilla (precaución) o roja (prohibición del baño) según las áreas costeras y en las franjas horarias de mayor intensidad.

Los bañistas notaron que una fuerte corriente les arrastraba hacia adentro sin que incluso los nadadores experimentados pudieran competir contra la corriente. En este caso, lo peor que puede ocurrir es la muerte por cansancio y ahogamiento o por no saber nadar, ya que estas corrientes son superficiales o sub-superficiales y por lo general, salvo excepciones relacionadas con la morfología de la costa y los fondos marinos, no provocan succión sino arrastre.

Según los medios de comunicación local, el día 21 se realizaron aproximadamente unos 200 rescates en el mar, concentrados en su mayoría en las playas de Chiclana de la Frontera (~30), Conil de la Frontera (~50), Vejer de la Frontera (~50) y Cádiz (27). También se efectuaron 8 rescates en Barbate, otros 4 en San Fernando, 6 en Rota y 2 en El Puerto de Santa María. En Conil de la Frontera y Cádiz, voluntarios de Protección Civil recorrieron las playas a pie o en *quads* para advertir a los usuarios del riesgo del baño, ya que muchos de ellos hicieron caso omiso del color de las banderas. Dichas advertencias también fueron emitidas constantemente por los sistemas de megafonía fijos y móviles, aunque no todas las

playas contaban con estos sistemas. Además, como medida de precaución adicional, en lugares como Cádiz capital se amplió el servicio de playas una hora más de lo habitual.

El miércoles 22 se volvieron a registrar los mismos efectos de resaca, si bien con algo menos de intensidad que el día anterior, obligando a rescatar a 17 personas en Conil de la Frontera, 12 en Cádiz, 1 en Chiclana de la Frontera y 3 en San Fernando. El día 23 se retornó finalmente a la normalidad.

Tabla 3. Número de rescates realizados en las playas del litoral gaditano.

	Martes 21	Miércoles 22
Barbate	8	n/d
Cádiz	27	12
Chiclana de la Frontera	52 ¹⁰	1
Chipiona	n/d	n/d
Conil de la Frontera	≈50	17
El Puerto de Santa María	2	n/d
Rota	6	n/d
San Fernando	4	3
Vejer de la Frontera	≈50	n/d

Los datos oceanográficos disponibles indican que este impacto generado por la fuerte resaca fue debido principalmente a los efectos y proximidad del huracán Gordon. No obstante, las corrientes de resaca o *rip currents* no solo pueden ser causadas por la llegada de marejadas ciclónicas. En general se originan cuando las olas que llegan a las costas no tienen la misma altura a lo largo de su cresta y rompen antes por una sección que por otra de una misma ola. Las olas de mayor altura rompen antes que las más bajas, llegan a la orilla e inician el camino de retorno hacia adentro arrastrando arenas, algas y otros sedimentos y cruzándose con los rompimientos menores. Digamos que se produce una colisión entre corrientes inversas, que es lo que produce ese aspecto espumoso tan características de marea batida (imágenes 22, 23 y 24). Esto da lugar a su vez a un mecanismo de reflujos, en el que las personas y objetos flotantes se ven arrastrados repentinamente hacia adentro por una fuerte corriente procedente de la orilla.

La corriente de resaca es, en suma, un potente flujo de agua (a veces superior a 1 m/s, lo que suele ser ya peligroso) en dirección a mar, que atraviesa la zona de rotura y termina en un abanico de reflujos o *rip head* (cabeza de corriente). Estas corrientes de resaca a menudo presentan un espaciado regular, pero se hacen asimétricas a medida que aumenta el ángulo de ataque del oleaje. Como decimos, se genera por una rotura irregular de la ola a lo largo de la cresta. Es decir, las olas no siempre tienen la misma altura a lo largo de la cresta cuando rompen, sino que en ciertas secciones de ella la altura es mayor. Justamente las zonas de la ola

¹⁰ Se ofrece aquí el dato real aportado por Cruz Roja Española y no el facilitado por los medios de comunicación.

de mayor altura descargan el agua sobre la pendiente de la playa, que al regresar hacia el mar fluye por entre las rompientes de menor altura, generándose así una corriente de resaca. Cuanto mayor altura tengan las olas, mayor será la corriente de resaca. Estas corrientes se ven reforzadas con las corrientes de marea, por lo que cuando la marea está bajando se hacen más peligrosas, al ser más fuertes a la mitad del ciclo entre mareas.

En otras palabras, las corrientes de resaca son originadas por la llegada del oleaje a las costas y por la interacción que se produce entre el oleaje incidente (el de llegada) y el oleaje reflejado (el de retorno), o bien entre el oleaje incidente y las denominadas ondas de borde (energía atrapada en la zona de rompiente, que es el lugar en el que rompen las olas incidentes). Las secciones de mayor altura de una ola, donde el apilamiento de agua es mayor, rompen antes que las más pequeñas. Cuanto mayor es su volumen, mayor es su impulso, de modo que al llegar a la orilla e iniciar su camino de retorno lo hace hacia las posiciones donde encuentra menos resistencia, esto es, por donde la altura de las olas son menores —menor apilamiento de agua y menor impulso del oleaje incidente—. Durante los días 20, 21 y en menor medida el 22, la costa de Cádiz recibió un oleaje que si bien no era de gran altura en aguas profundas (algo superior al metro) sí que presentó unos períodos bastante largos (14 s). Este tipo de oleaje denominado mar de fondo es el que suele generar este tipo de fenómenos, favoreciendo tanto los fenómenos de reflexión como la creación de ondas de borde. Por otro lado, los períodos tan largos hacen que cuando ese oleaje llega a zonas someras se peralta mucho más que oleajes con períodos cortos, generando mayor altura en las zonas de rompiente.

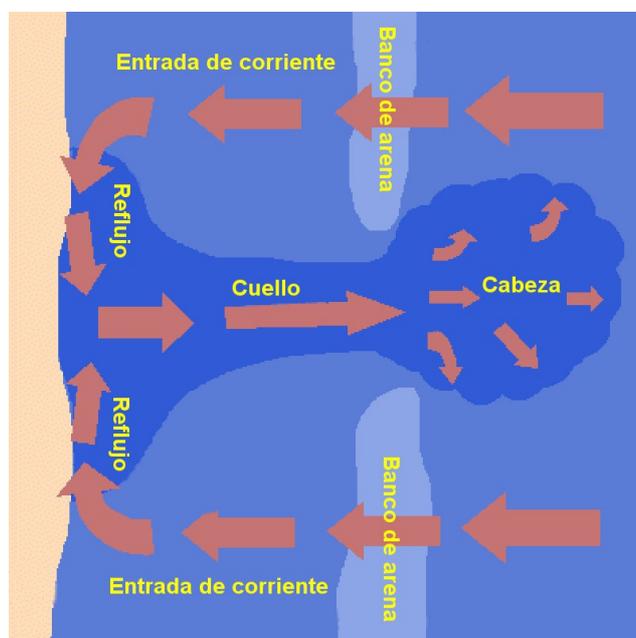


Imagen 21. Obsérvese el mecanismo que actúa durante una resaca marina. Fuente: National Weather Service, Wilmington (Carolina del Norte) con traducción al español por IAEM-España.

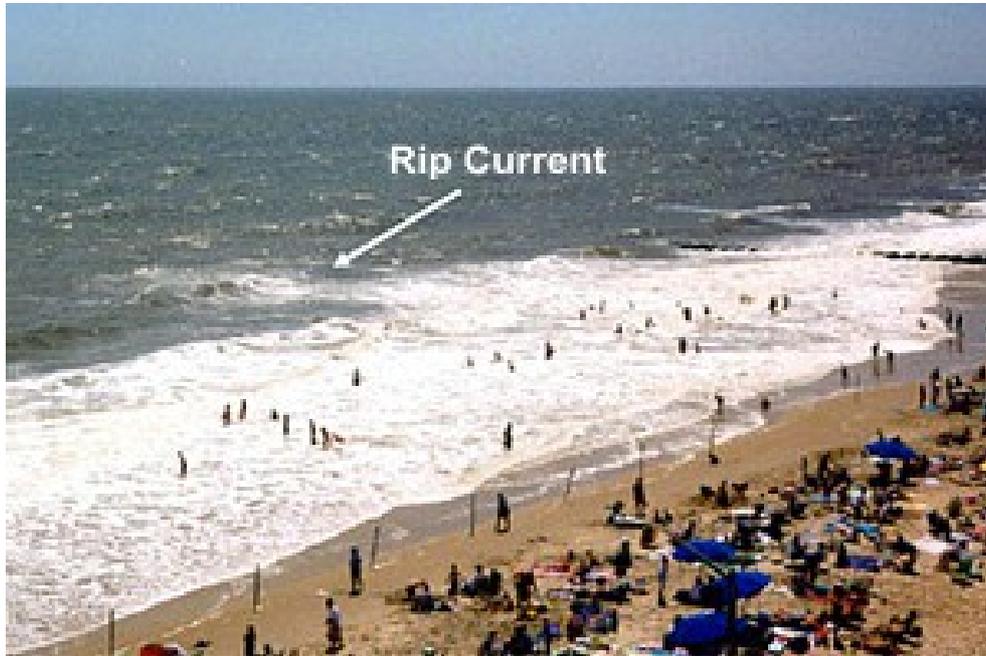


Imagen 22. Corriente de resaca. Obsérvese en el centro de la imagen la cabeza formada por la resaca.
Fuente: NOAA Ocean Service Education.



Imagen 23. Corriente de resaca. Obsérvese la corriente de regreso hacia mar adentro. Fuente: NOAA Ocean Service Education.



Imagen 24. En esta fotografía del U.S. Army Corps of Engineers se observa claramente el reflujó desde la orilla hacia el centro, formando un cuello de resaca. Las flechas rojas indican la situación de la cabeza.

Durante estos días se produjo también una marea astronómica especialmente elevada debido a la alineación del Sol, la Luna y la Tierra. Estos alineamientos o *sicigias* se producen durante la luna nueva y la luna llena, es decir, cuando la Luna se encuentra interpuesta entre el Sol y la Tierra o cuando la Luna se encuentra en el lado contrario de la Tierra opuesta al Sol, respectivamente. Cuando se dan estas fases lunares —una vez cada quince días aproximadamente—, la marea crece algo más de lo habitual y se denomina «marea viva» o «marea astronómica». Con la luna nueva se llamaría «marea de conjunción» y con la luna llena «marea de oposición». El episodio del 21 y 22 de agosto de 2012 coincidió con una *sicigia* de luna nueva en tránsito hacia el cuarto creciente¹¹. Esto significa que el fuerte oleaje coincidió con una marejada astronómica que pudo aumentar o reforzar los efectos de la resaca, ya que favorece su propagación.

En cuanto a la posible incidencia de una «marea meteorológica» o «marejada ciclónica» o lo que se denomina «residuo» de la marea, apenas ascendería más allá de unos pocos centímetros. Este tipo de marea es consecuencia de las variaciones de presión atmosférica y del viento reinante en las áreas costeras, pero en el caso que nos ocupa el viento era escaso y la presión atmosférica superior a los 1.000 hPa, lo que implicaba un tiempo muy estable. La marea meteorológica se produce ante la presencia de un sistema de bajas presiones sobre un área marítima de profundidades reducidas o al menos en zona de plataforma, considerándose ésta como la franja costera donde el fondo marino desciende desde los 0 hasta

¹¹ La luna nueva completa fue el 17 de agosto de 2012.

los 200 m de profundidad. En estos casos sí se puede generar importantes variaciones del nivel del mar; pero según los estudios realizados en el Golfo de Cádiz por la Universidad de Cádiz (Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Departamento de Ciencias de la Tierra) raramente superan los 50 cm de altura (grandes temporales invernales con períodos de retorno mayores de 10 años), muy poco con respecto al rango medio de marea astronómica, que en esta zona está en torno a los 3 m.

Esta resaca podría haber sido motivada también por un pequeño tsunami —posibilidad que algunos barajaron en un primer momento—, pero debemos descartarlo completamente al no haberse producido ningún terremoto ni cercano ni lejano de una magnitud suficiente como para generar un efecto tsunamigénico. Por tanto, la «marea de tormenta» fue básicamente el sumatorio de la marejada ciclónica y la marejada astronómica.

3.1.1. Informes de campo: Cádiz.

A lo largo del martes 21 de agosto, aconteció un fenómeno inhabitual e infrecuente —según palabras del Coordinador de Protección Civil— en las Playas de Cádiz, en forma de de mareas de resaca, que provocó que un importante número de bañistas fueran arrastrados mar adentro mientras se bañaban. Esto desorientó a los servicios de playa y protección civil por un indicador importante: el oleaje presente no era acorde con un factor de riesgo aparente. De hecho, la altura media de las olas no superaba el metro de altura. Sin embargo, un efecto no perceptible a la vista provocaba arrastre fuerte, que hacía perder el control a los bañistas y que al intentar nadar en contra provocaba agotamientos y riesgo de ahogamiento.

Los servicios de salvamento de playas contratados por este Ayuntamiento registraron un elevado número de intervenciones, fuera de toda experiencia y sin precedentes. El coordinador de los socorristas efectuó una llamada al Coordinador de Protección Civil, quien verificó la situación llamando al Centro Local de Coordinación de Salvamento Marítimo (CLSM), confirmándose que dicha situación también se estaba produciendo en otros municipios.

Valorando la situación como de «anormal», llamó inmediatamente también al Director del Área, quien lo puso en conocimiento del Teniente de Alcaldesa y Delegado de Seguridad. Se dispuso una rápida reunión de urgencia en el módulo central de playas para seguimiento de la situación y adopción de medidas de emergencia, citando también a la Concejala Delegada de Playas y al Director de Medio Ambiente. Se oyeron las aportaciones del Oficial de Policía Local de servicio en playas y del coordinador de los socorristas en ese momento.

Teniendo en cuenta las indicaciones que tienen las banderas de colores en los baños en playas, se valoró entre izar la de color roja o la amarilla, valorando que la primera significa «prohibido el baño», porque éste es incompatible con la salud o la vida, y la amarilla, que significa «bañarse con precaución». Se optó por esta última, ya que siempre que los bañistas no perdieran pie no debían de correr peligro. Para ello se adoptaron las siguientes medidas:

- Disponer la prolongación del servicio de salvamento en playas hasta las 21:00 con tres de las cinco embarcaciones, asistidas por las siete torres de vigilancia más el botiquín central y una UVI móvil.
- Redactar mensajes de advertencia sobre la resaca existente y la adopción de mensajes preventivos, que fueron difundidos por la megafonía de playas cada cinco minutos hasta las 21:00.

Al día siguiente se continuó con las mismas premisas del martes, convocándose un gabinete de seguridad compuesto por:

- Juan Antonio Guerrero, Teniente de Alcaldesa y Delegado de Seguridad.
- Lola Palomino, Concejala Delegada de Playas.
- Germán Molina, Director de Tráfico y Protección Civil.
- Pablo Rey, Intendente de la Policía Local.
- Juan Carlos Martín, Director de Medio Ambiente.
- José Manuel Calvo, Coordinador de Protección Civil.

Se efectuaron gestiones múltiples tendentes a buscar una explicación plausible al fenómeno que estaban causando esas mareas de resaca, para lo que se contactó con:

- Puertos del Estado.
- Emergencias 112-Andalucía.
- Demarcación de Costas.
- Dirección General de Protección Civil, Área de Riesgos Naturales.
- IAEM-España.
- Otros expertos y gestores de emergencias.

Tras análisis y debate de la situación y toma en conciencia de la relación de causa y efecto que provocaban las mareas de resaca sobre los bañistas, se optó por las siguientes medidas:

- 1) Activación del PEM (Plan de Emergencia Municipal) en grado de PRE-EMERGENCIA, con puesta en servicio del CECOPAL (Centro de Coordinación de Operaciones Municipales).
- 2) Continuación con las banderas amarillas debido a que no se justificaba la bandera roja, ya que bañarse en sí no era peligroso mientras no se hiciera en aguas profundas.
- 3) Suspender las prestaciones de baños asistidos a discapacitados, empleando a esos socorristas a reforzar la vigilancia en tierra.
- 4) Emitir mensajes por megafonía cada 10 minutos.
- 5) Activación de la Agrupación de Voluntarios de Protección Civil para que con los vehículos todo-terreno hicieran llegar la información a las zonas donde la megafonía no llegaba y participar en las emergencias si se diera el caso.

- 6) Seguimiento directo de la evolución de la situación por los componentes del gabinete activado.

El martes 22, se volvió a reunir el gabinete, disponiendo lo siguiente:

- 1) Continuación con las banderas amarillas hasta que no se confirmase la conclusión total del fenómeno adverso.
- 2) Lanzamiento de boyas al agua para observar sus derivas, que hasta ese momento no revestían la presencia de importantes corrientes superficiales.
- 3) Valorar el seguimiento de los usuarios.
- 4) Continuar con la megafonía.
- 5) Localización permanente del gabinete siguiendo la evolución.

3.1.2. Informes de campo: Chiclana de la Frontera.

Informe de Protección Civil.

En las playas de Chiclana de la Frontera, desde el poblado de Sancti-Petri hasta los límites del Cabo de Roche, se sintieron también los efectos de las corrientes de resaca marina —la misma resaca que se notaría también en Conil de la Frontera— desde el amanecer del día 21 de agosto y aumentando en intensidad durante la tarde del mismo día.

Ante esta peligrosa y desconcertante situación en la que los servicios operativos de playas estaban siendo desbordados, el Coordinador de Protección Civil, el Jefe de Agrupación y el Coordinador local de Cruz Roja decidieron convocar una reunión de urgencia en la que se informó al director del Área, y al Teniente de Alcalde y Delegado de Seguridad. En dicha reunión, llevada a cabo en el módulo central de playas y en la que estuvieron también presentes el Concejal de Playas y el Director de Medio Ambiente, se dispuso un seguimiento de la situación y se adoptaron medidas de emergencia.

A la conclusión de dicha reunión se decidió izar la bandera roja de prohibición del baño, ordenándose a los equipos de salvamento y rescate que Policía Local, Protección Civil y Cruz Roja desalojaran la zona de baños y auxiliaran a todos los bañistas de forma inmediata para evitar posibles ahogamientos. Cruz Roja sustituyó la bandera verde en todas sus torretas a lo largo de la playa de La Barrosa, mientras que desde tierra los socorristas avisaban a los usuarios del peligro inminente que se estaba produciendo.

Por otra parte, la Policía Local y voluntarios de Protección Civil ayudaron en esta labor a bordo de sus vehículos quads, recorriendo toda la orilla e informando al público de la prohibición, mensajes que se estuvieron emitiendo por megafonía cada cinco minutos. En algunas situaciones comprometidas en las que se divisaba a algún bañista mar adentro, rápidamente se avisaba a Cruz Roja para que mediante sus embarcaciones o zodiacs lo rescatasen y condujesen a tierra firme.

Estas medidas de precaución se comenzaron a aplicar a las 15:30 horas y la situación de emergencia se dio por finalizada a las 21:00 del día 21 de agosto. Al día siguiente, y desde primeras horas de la mañana, todavía se divisaban en determinados puntos de la playa numerosas corrientes de resaca marina, aunque fueron decayendo conforme avanzaba la jornada.

Al finalizar el día, los efectos derivados de este fenómeno eran ya inapreciables, por lo que se levantaron las prohibiciones manteniendo la alerta de los servicios operativos de playas.

Cabe destacar también la colaboración de numerosos bañistas que ayudaron a salir del agua a personas con problemas, sirviéndose de sus propios medios.

Informe de Cruz Roja Española.

A las 13:00 aproximadamente del 21 de agosto de 2012, los servicios de salvamento acuático de Cruz Roja Española realizaron el primer rescate en las playas de Chiclana de la Frontera a la altura del puesto central de la playa de La Barrosa, en lo que en esta localidad se conoce como «tercera pista». El episodio ocurrió de una forma totalmente inesperada, ya que hasta ese momento la mar se encontraba en calma.

Lo que más llamó la atención de los socorristas fue que empezaron a entrar grandes olas, aparentemente generadas por mar de fondo, en un día que se anunciaba magnífico y sin viento reinante. Sin embargo, las corrientes de retorno o resaca comenzaron a ser tan fuertes que la primera intervención dio como resultado un rescate múltiple de tres personas integrantes de una misma familia que había sido arrastrada por dicha corriente hasta el balizado que delimitaba la zona de baño con la de navegación.

En ese momento no disponían de la predicción meteorológica oficial para la jornada, contando solo con los datos publicados por una conocida página web donde se muestra el tiempo y el estado de la mar. En base a esta información extraoficial, desde días antes se podía augurar que en la fecha del 21 de agosto habría un gran oleaje, aunque no se le dio demasiado crédito esta vez como en muchas otras ocasiones en que se predice un gran oleaje que no llega a materializarse.

Aquel día las olas fueron creciendo, lo que se convirtió en un efecto llamada para un elevado número de surfistas por las buenas características de estas olas, grandes y rompiendo en tubo, condiciones que generan una gran actividad de surf pero que a la vez se vuelve muy peligrosa para los bañistas extranjeros, foráneos o inexpertos debido a la gran energía cinética que generan este tipo de olas al romper. Cruz Roja calcula que tenían un período de entre 20 minutos y 30 segundos entre series de olas, lo que lo hace un día perfecto para el surf.

El rescate con embarcación neumática con estas condiciones de mar se hace muy peligroso si no se toman todas las medidas de seguridad, por lo que teniendo en cuenta dichos

períodos de oleaje bastó con tomarse unos segundos, contar las series y salir en el momento oportuno, ejecutando la misma maniobra para entrar.

Se reforzó el número de socorristas acuáticos, ya que prácticamente se estaba trabajando al límite. Al ser un caluroso día de verano con una playa abarrotada de bañistas, las tareas de prevención consistieron en explicar a los usuarios boca a boca y a través de megafonía que el baño estaba prohibido, al tiempo que se continuaba con los rescates tanto con la ayuda de embarcaciones como con técnicas de extracción a nado.

Las autoridades y responsables del servicio de playas tomaron la decisión de izar la bandera roja, sobre todo por la amenaza que suponían las extensas y fuertes corrientes de resaca. Bastaba con situarse a un cierta altura de la costa para ver con claridad estas extrañas corrientes que socorristas experimentados no habían visto jamás en la playa de La Barrosa.

Aquel 21 de agosto el operativo de seguridad en playa acabó con 52 personas rescatadas por Cruz Roja y 44 avisos y recomendaciones preventivas realizados por megafonía. A estas cifras se podría sumar un número indeterminado de rescates realizados por surfers, que colaboraron por su cuenta y riesgo en las operaciones de salvamento. Por su parte, los servicios de Protección Civil colaboraron facilitando información a los bañistas sobre los motivos de la prohibición del baño.

La expectativa era saber cómo se presentaría el día siguiente, que sin embargo fue un día casi normal de playa. El escaso oleaje remanente fue a menos a medida que avanzaba el día, izándose la bandera amarilla y realizándose un único rescate.

3.1.3. Informes de campo: Conil de la Frontera.

Conil de la Frontera fue una de las localidades costeras, junto a Cádiz, en la que resultaron más apreciables los efectos de la resaca marina y en la que se efectuó un mayor número de rescates acuáticos. Según el Coordinador de Protección Civil municipal, Nicolás Amaya Trujillo, el día 21 de agosto despertó con unas extrañas corrientes no habituales en la zona tanto en su forma como en la dinámica de la marea. Aunque este estado del mar se mantuvo extrañamente alterado durante los días 21 y 22 de agosto, la corriente de resaca fue especialmente evidente ese mismo día por la tarde, coincidiendo con las horas finales de la segunda pleamar de la jornada, que fue completa a las 18:19. El coeficiente de marea era alto, midiéndose 1,3 m de altura frente a los 1,2 m de altura de la primera pleamar, que tuvo lugar a las 06:00. La bajamar intermedia se produjo a las 12:01 de la mañana, con un coeficiente de descenso de -1,2 m.

La fuerza de las corrientes obligó a realizar diversas intervenciones en número indeterminado —en torno a las 50 según la prensa local—, consistentes fundamentalmente en el rescate acuático de bañistas que no siguieron las recomendaciones que desde los servicios de playas se estuvieron difundiendo a través de la megafonía, mediante la izada de banderas rojas de peligro y de viva voz por parte de los propios socorristas. Dichas corrientes

arrastaban todo lo que encontraban a su paso desde la orilla hasta unos 250 metros hacia adentro, más allá por tanto de la zona reservada para el baño (200 m). Estas mismas corrientes desaparecían y volvían a reaparecer en distintos sitios sin un razonamiento lógico para quienes pudieron atestiguarlo.



Imagen 25. Desde un parapente se podía observar claramente la formación de la corriente de resaca en una de las playas de Conil de la Frontera. Obsérvese la coloración grisácea y dirección de los arrastres sólidos de la franja litoral y de la cabeza del hongo en el centro de la imagen. Foto cedida por Nicolás Amaya Trujillo.



Imagen 26. Casi en la vertical de la corriente de resaca, la formación del refluo, el cuello y la cabeza son más que evidentes. Foto cedida por Nicolás Amaya Trujillo.

La técnica empleada para el rescate fue por medio de motos acuáticas y socorristas-rescatadores, de modo que un socorrista-rescatador se arrojaba al agua desde la moto, alcanzaba a nado al bañista y lo alzaba a la parte trasera del vehículo, cuyo conductor lo trasladaba a la orilla, donde lo depositaba en profundidades no superiores a un metro. Al término de cada traslado, la moto acuática recogía al socorrista-rescatador y buscaban al siguiente bañista en peligro, y así hasta finalizar todos los rescates.



Imagen 27. En la imagen se muestra con claridad el efecto de retroceso de la cresta espumosa de las olas y del canal situado al pie de la corriente de resaca. Foto cedida por Nicolás Amaya Trujillo.



Imagen 28. Fotografía tomada desde la misma línea costera. Foto cedida por Nicolás Amaya Trujillo.

3.1.4. Informes de campo: Sanlúcar de Barrameda.

En las playas de Sanlúcar de Barrameda no se apreció ningún efecto de corriente de resaca, pero sí una fuerte marejada por encima de lo normal. Según nos reporta Teodoro Barba Durán, Coordinador de Protección Civil de esta localidad, la conocida «barra» de depósitos sedimentarios existente en la desembocadura del Guadalquivir provocó que la rompiente de la marea se formara mucho más distante de la costa que en otras playas, lo que debió reducir el impulso del tren de olas, llegando a la orilla de forma más suave y generando menos reflujos. Sí se observó, no obstante, una gran acumulación de espuma en una amplísima franja costera.

La elevación del mar pudo superar los 50 cm, con crestas de más de 1 m de altura. Asimismo, el *run-up*, es decir, el alcance de la marea, fue muy superior también a lo habitual, llegando a tocar la infraestructura del Paseo Marítimo, salvo en la playa de las Piletas, por su posición mucho más retirada del estuario. Esta crecida del nivel del mar fue especialmente rápida, calculándose que la pleamar se adelantó en una hora sobre lo previsto.

En total se realizaron dos rescates de bañistas el día 21, aunque esta cantidad está dentro de la media diaria en las playas sanluqueñas, por lo que no es posible relacionarlos directamente con los efectos de este episodio.

3.1.5. Informes de campo: Tarifa.

A pesar de que los medios de comunicación locales informaron de que en el municipio de Tarifa no se había sentido el efecto de la resaca marina, los testigos presenciales nos reportan una información contraria. El Coordinador de Protección Civil de Tarifa, Rodrigo Serrano, señala que entre los días 21 y 22 se notó «mucha mar», con muchísima resaca, que obligó a los servicios de playas a izar la bandera roja, al igual que se hizo en otras playas de municipios próximos. Varios rescatistas tuvieron que patrullar la orilla a pie o en vehículos para comunicar verbalmente a los usuarios el riesgo existente y la prohibición del baño. Según su experta opinión, se trató de un fenómeno totalmente inusual para este época del año.

En estos dos días se contabilizaron 12 rescates, siendo el número normal tanto en semanas anteriores como posteriores de 3-4 rescates a la semana. Por tanto, el número de rescates se elevó esa semana a 16.

3.1.6. Informaciones de prensa: Huelva.

En las costas de Huelva, las playas donde se sintieron con más intensidad los embates de las olas fueron Matalascañas y Mazagón. Durante la mañana del día 21 y sobre todo durante las horas de la tarde, el estado del mar empeoró súbitamente con la llegada de fuertes corrientes marinas y olas altas de las que fueron testigos la gran mayoría de los usuarios de las playas, así como los medios de comunicación. Estos hechos fueron más evidentes durante la pleamar, llegando hasta el paseo marítimo de Matalascañas. En Mazagón las olas llegaron a

elevarse hasta los 2 m de altura.

3.1.7. Informaciones de prensa: Portugal.

En Portugal también tuvo sus consecuencias. El día 21 de agosto se registraron en las playas portuguesas fuertes corrientes marinas que obligaron a izar la bandera roja en muchas de ellas, como en Troia, Caparica, Fonte de Telha y Carcavelos, en los distritos de Setúbal y Lisboa, a pesar de que los registros del Instituto de Meteorología de Portugal no identificaron ningún dato anormal. Sin embargo, las olas llegaron a alcanzar los 3 m de altura, según los testigos. En Carcavelos tuvieron que ser rescatadas cinco personas y uno de los rescatadores resultó herido al golpearle una tabla en la cara. También se tiene constancia del fallecimiento de dos turistas de nacionalidad inglesa, un abuelo de 66 años y su nieta de 5 años, que perecieron ahogados en la playa de Nazaré, en el distrito de Leiria, cuando andaban cerca de la orilla en compañía de una tercera persona. Se desconoce si el suceso tuvo relación con la resaca marina, pero todo apunta a una acción invasiva del mar posiblemente relacionada con el mismo episodio.

El día 22 las banderas amarillas sustituyeron a las rojas, aunque los bañistas también hacían allí caso omiso a esta señalización.

La meteoróloga Paula Leitão, del Instituto de Meteorología de Portugal, afirmaba a la cadena TVI que con la información disponible no existían motivos para pensar que hubiera ocurrido algo fuera de lo normal, pero reconocía que los registros son limitados y «no lo ven todo». Añadía también, en relación con el huracán Gordon, que este fenómeno «da origen a olas con una energía diferente», que revientan más dentro de las playas y con más fuerza que en aguas abiertas. Pero en base a los registros disponibles no era posible establecer una relación certera entre la resaca marina y la proximidad del Gordon. «Es un caso un poco diferente de lo normal, levanta muchas sospechas. Desde el punto de vista científico es un caso para registrar y observar con más atención, pero no puedo dar certezas», concluía.

En resumen, el efecto fue visible incluso para los propios bañistas, que en su mayoría desistieron voluntariamente de practicar el baño; pero no fue detectado —ni es detectable— por los sistemas de predicción meteorológica portugueses.

3.2. Efectos del huracán Gordon sobre el oleaje, las corrientes y el nivel de mar.

3.2.1. Oleaje.

3.2.1.1. Descripción general.

El huracán Gordon, caracterizado en los apartados anteriores, generó un fuerte oleaje a lo largo de su trayectoria, sobre todo desde la madrugada del día 18 al día 20 de agosto, que es el período de tiempo en que tuvo categoría de huracán, con vientos de hasta 175 km/h.

El día 20 por la tarde perdió la categoría de huracán y se transformó en tormenta post-tropical, disipándose al colisionar con las altas presiones asentadas sobre la península ibérica, por lo que los días de los incidentes en la costa, 21 y 22 de agosto, no se daban condiciones adversas ni de viento, ni de bajas presiones atmosféricas, ni de oleaje.

A lo largo de su trayectoria, el huracán fue generando mar de viento, pero una vez abandonó una zona, este mar de viento se transformó en mar de fondo propagándose, casi intacto, con la dirección con la que fue generado, que no tiene por qué ser, y de hecho no fue, la dirección de la trayectoria del huracán.

Este mar de fondo, de período muy alto debido a la larga distancia recorrida, fue el que llegó a las costas del Golfo de Cádiz y sur de Portugal los días 21 y 22, a pesar de que el huracán se aproximó a la Península Ibérica en torno a una latitud de 38°, bastante más al norte que la zona en la que se produjeron los incidentes.

Como se muestra con el análisis de las medidas de la boya costera de Puertos del Estado, en el momento en que este mar de fondo llegó a la costa se produjo la coexistencia de dos componentes de oleaje de períodos muy distintos, lo que coincidiría con la explicación que se ofrece en el capítulo 3 de este informe.

3.2.1.2. Medidas de oleaje en la zona durante el fenómeno.

Puertos del Estado tiene, en las costas de Cádiz, dos puntos de medida de oleaje (imagen 29):

- Boya fondeada en aguas abiertas perteneciente a la Red Exterior de boyas cuya posición habitual es: 36,48° N, 6,96° W. Esta boya sufrió un accidente y desapareció el día 13 de julio. Se sospecha que el accidente fue producido por una colisión con un barco, pero no se logró recuperar y se fondeó una nueva boya el 24 de agosto de 2012, por lo que no hubo medidas los días del incidente.
- Boya costera: sí estuvo operativa. Su posición y las medidas registradas se pueden ver en la imagen 29 y la tabla 4.

En la tabla 4 se muestran las medidas de la boya costera de Cádiz. Aunque la boya mide datos horarios, por sintetizar, se muestran las horas coincidentes con las salidas del modelo (cada tres horas). Los parámetros mostrados son:

- hm0: altura significativa (en metros).
- th13: período significativo. Es el período medio del tercio de olas más altas (en segundos).
- tp: período de pico. Indica el período de las olas de máxima energía (en segundos).
- dmd: dirección media de procedencia del oleaje (en grados, siendo 0° → N; 90° → E).

- **dmd_p**: Dirección media en el pico espectral. Dirección de procedencia de las olas de máxima energía (en grados, siendo 0° → N; 90° → E).



Imagen 29. Posición en el mapa de las dos boyas (costera y aguas profundas). El recuadro describe la boya costera, operativa durante el fenómeno.

Tabla 4. Resultados del análisis de datos brutos (PdE).

Fecha	hm0	th13	tm02	tp	dmd	dmd_p
2012-08-21 03:00:00	0,50596	7,6	4,71405	8,3	251	276
2012-08-21 06:00:00	0,60663	8,12	5,23268	7,67	252	277
2012-08-21 09:00:00	0,4899	9,06	5,53283	14,26	256	254
2012-08-21 12:00:00	0,52154	8,79	5,71772	13,29	243	251
2012-08-21 15:00:00	0,68118	10,13	4,74137	12,48	241	260
2012-08-21 18:00:00	0,60663	8,49	4,72547	12,48	226	254
2012-08-21 21:00:00	0,78994	12,03	6,61968	12,47	251	257
2012-08-22 00:00:00	0,66933	11,74	6,2361	11,09	251	257
2012-08-22 03:00:00	0,83905	11,86	7,19477	11,09	263	262
2012-08-22 06:00:00	0,83905	11,17	6,1064	9,98	262	262
2012-08-22 09:00:00	0,88544	9,59	5,65916	9,98	265	261
2012-08-22 12:00:00	0,83905	8,97	5,13296	9,98	264	261

En los datos de la boya se observa cómo las alturas no son muy elevadas (entre 0,5 y 1 m). El día 21, a primera hora, todos los períodos son los típicos de mar de viento (5-8 s) y se puede ver la llegada de un mar de fondo con períodos de hasta 14 segundos que se reflejan claramente en el período de pico y en el período significativo. El período medio se mantiene por debajo de 8 s, lo que indica la coexistencia de dos componentes de períodos claramente diferentes, siendo la de mayor período la dominante como se refleja en el período de pico y el período significativo. Además, ambas direcciones se mantienen en los mismos valores (250°-260°) indicando la misma dirección de las dos componentes del oleaje. Otro aspecto importante de esta situación es que se mantiene durante casi 24 horas.

Se han analizado los registros de esta boya de los últimos 12 años para comprobar la excepcionalidad de esta situación: coexistencia de dos componentes de distinto período con similar dirección, siendo la de mayor período la más energética y con una persistencia de 24 horas. Se ha comprobado que existen registros en los que nos encontramos con valores muy similares en los períodos y en las direcciones, pero las situaciones se producen principalmente en otoño e invierno. Sólo hay unos pocos registros aislados que se producen en los meses de verano, pero de muy corta duración. Según el análisis comparativo realizado sobre los datos, esta situación no se había producido de manera tan clara y tan persistente durante un mes de agosto con anterioridad (desde el año 2001).

3.2.1.3. Análisis del oleaje durante el fenómeno, basado en mapas.

La predicción de oleaje de Puertos del Estado funciona dos veces al día. En cada ciclo, el modelo numérico se procesa desde las 12 horas previas al ciclo que ya han pasado y hasta 72 horas de predicción.

Esas 12 horas previas se denominan análisis y los resultados son de calidad superior a las predicciones porque, al disponer de medidas, el modelo atmosférico ha sido corregido con las mismas.

La descripción que se va a realizar en este apartado va a estar basada en mapas de viento y oleaje correspondientes a las 00:00 de cada ciclo de predicción, por lo que se trata de campos en los que el viento ha sido corregido con medidas. Los días que se analizan son del 18 al 20 de agosto, con dos campos por día, correspondientes a los dos ciclos de predicción.

Es importante señalar que la predicción de oleaje de Puertos del Estado dispone de un mecanismo de separación de mar de viento y mar de fondo, que se representan con vectores verdes y blancos, respectivamente, en los mapas de las imágenes 30 y 31.

En el mapa de oleaje del día 19 a las 12:00 se puede observar que, en la zona del huracán se generó mar de viento en dirección de propagación este con una ligera componente norte.

En los siguientes mapas se observa cómo este oleaje ya se ha transformado en mar de fondo y su dirección de propagación es distinta que la trayectoria del huracán, que tiene una componente norte mucho más acusada.

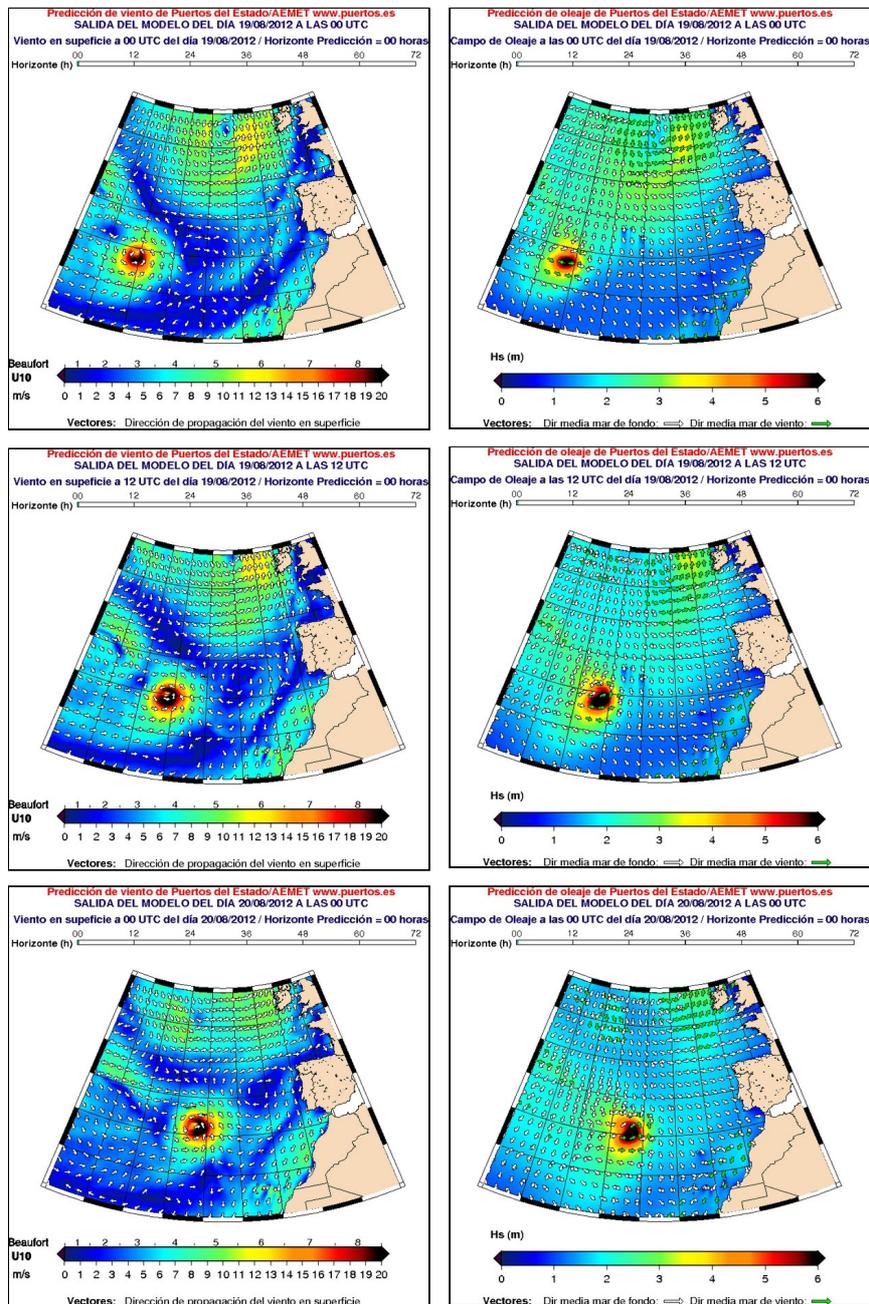


Imagen 30. Mapas de viento (derecha) y oleaje (izquierda) para el día 19 a las 00:00 y 12:00, y día 20 a las 00:00.

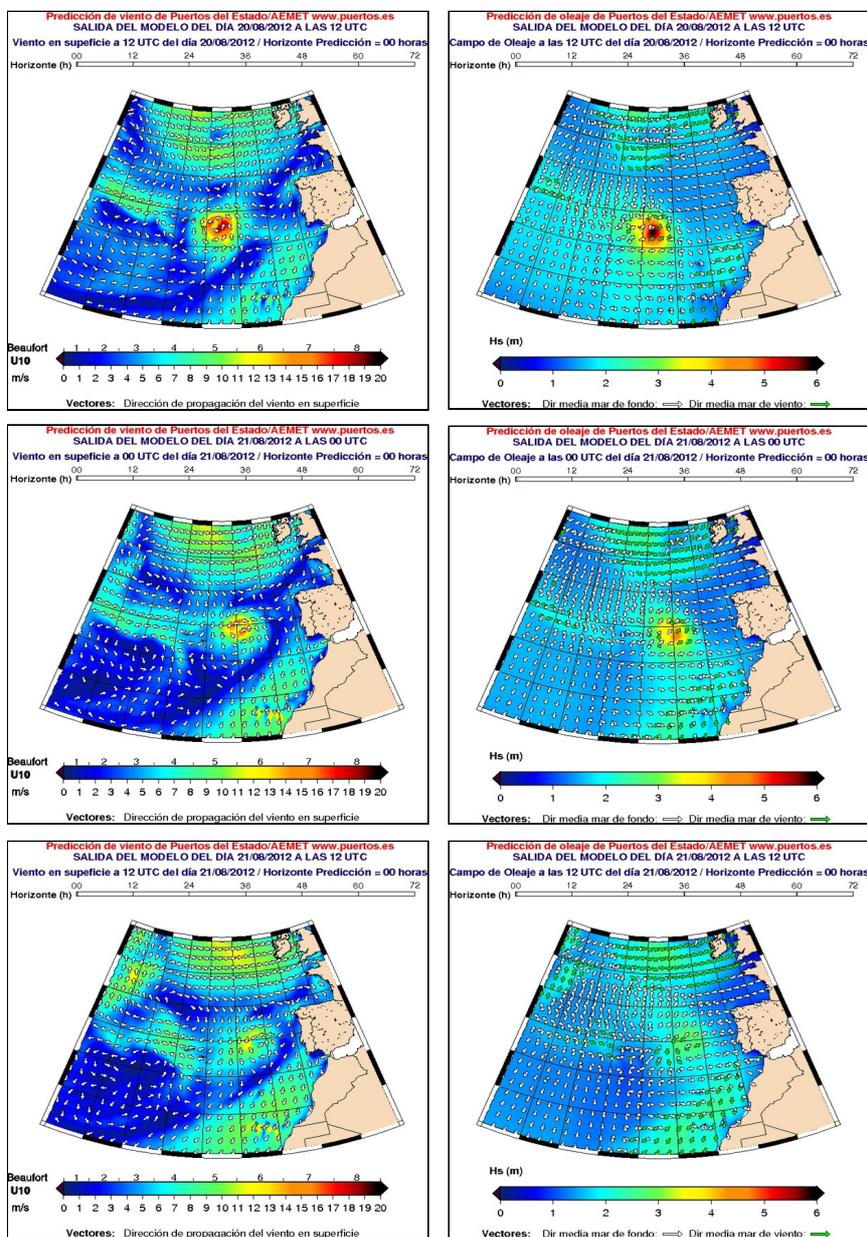


Imagen 31. Mapas de viento (derecha) y oleaje (izquierda) para el día 20 a las 12:00 y día 21 a las 00:00 y 12:00.

Concretamente en los mapas del día 21 a las 00:00 y a las 12:00 se puede ver claramente al sur del centro del huracán, ya convertido en tormenta subtropical, la presencia de un mar de fondo de entre 2 y 3 metros, propagándose en dirección al Golfo de Cádiz. Este oleaje alcanzará plenamente la costa de Cádiz el día 21 a última hora de la mañana, como se puede ver en las series temporales de los datos de la boya costera.

3.2.1.4. Análisis espectral en el punto de la boya costera de Cádiz.

El sistema de predicción de oleaje de Puertos del Estado dispone de un mecanismo para separar las diferentes componentes del espectro y calcular para cada una de ellas la altura significativa, la dirección media y el período de pico. Esto permite analizar, en un punto concreto, qué tipos de oleaje están incidiendo y entender mejor su comportamiento.

Para hacer este análisis se ha tomado el punto del modelo coincidente con la posición de la boya costera de Cádiz: 6,33° W 36,50° N. En la tabla 5 se muestran los distintos valores de altura significativa, en metros, y del período de pico en segundos, del mar total, es decir, del espectro completo sin hacer ninguna separación de componentes, y de las dos componentes más importantes del espectro, desde las 06:00 del día 21, hasta las 12:00 del día 22 de agosto de 2013. En el caso de las componentes se muestra también la dirección de procedencia de cada una.

Se puede ver, en la columna de la tabla correspondiente a la componente 1, cómo el día 21, a las 06:00 de la mañana, empieza a llegar un oleaje de período alto (14 s) y dirección de procedencia oeste-suroeste, que es coincidente con la que tenía el mar de fondo proveniente del huracán Gordon. Inicialmente, esta componente 1 es muy poco importante, teniendo una altura significativa de menos de 30 cm; pero poco a poco aumenta hasta convertirse a las 09:00 en el aporte principal, coincidiendo su período con el período de pico del mar total, con una altura que llega a ser de casi 1 m el día 22 a las 08:00 de la mañana, aunque para entonces su período ya ha disminuido hasta los 12 s.

Tabla 5. Valores de H_s y T_p del mar total (espectro completo) y H_s , T_p y dirección de procedencia de las dos principales componentes del mismo, desde el 21 de agosto a las 06:00, hasta el 22 a las 12:00.

Fecha	Mar Total		Componente 1			Componente 2		
	Hs	Tp	Hs	Tp	Dir	Hs	Tp	Dir
21-08-2012 06:00	0,5	7,4	0,2	14	WSW	0,4	6	W
21-08-2012 09:00	0,6	14	0,3	14	WSW	0,4	6	W
21-08-2012 12:00	0,6	14	0,4	13	WSW	0,4	5	W
21-08-2012 15:00	0,7	14	0,5	13	WSW	0,4	5	W
21-08-2012 18:00	0,8	13	0,6	13	WSW	0,3	6	W
21-08-2012 21:00	0,9	13	0,7	13	WSW	0,3	6	W
22-08-2012 00:00	0,9	13	0,8	12	WSW	0,4	6	W
22-08-2012 03:00	1,0	13	0,9	12	WSW	0,4	5	W
22-08-2012 06:00	1,1	12	0,9	12	WSW	0,5	5	W
22-08-2012 09:00	1,1	12	0,9	11	WSW	0,6	5	W
22-08-2012 12:00	1,1	12	0,9	11	WSW	0,7	5	W

Este análisis corrobora el análisis hecho con las medidas de la boya costera (ver tabla 4).

3.2.2. Nivel del mar.

3.2.2.1. Sistemas de medida y predicción numérica.

Puertos del Estado dispone de 3 mareógrafos o sensores de nivel del mar de la red REDMAR, próximos a la zona de costa en que se produjeron las incidencias. Instalados en los puertos de Huelva, Sevilla (Bonanza) y Tarifa, miden el nivel del mar, la onda larga y la agitación (oleaje en el interior del puerto). Los datos de nivel del mar se transmiten cada minuto a Puertos del Estado donde se integran y visualizan en su página web así como en un sistema de alertas tanto de nivel del mar como de onda larga. Se entiende aquí por onda larga cualquier oscilación del nivel del mar anómala y de período de varios minutos, que puede ser generada por oleaje, cambios en la presión atmosférica, tsunamis, etc.



Imagen 32. Posición de mareógrafos de la REDMAR en la zona. Derecha: mareógrafo de Huelva, en el puerto deportivo de Mazagón.

Además, Puertos del Estado dispone de un sistema operativo del nivel del mar (NIVMAR) que incluye tanto la marea astronómica (periódica y relacionada con las posiciones relativas de Sol, Luna y Tierra) como la a veces llamada marea meteorológica o residuo, no periódica y debida al efecto combinado de la presión atmosférica y el viento. El horizonte de previsión es de 72 horas y los campos de presión y viento provienen de AEMET. Tanto los sensores REDMAR como el sistema de previsión estuvieron operativos durante los días 21 y 22 de agosto.

3.2.2.2. Análisis de la evolución del nivel del mar durante el fenómeno.

Como ya se ha mencionado, el fenómeno coincidió con mareas vivas, cuando las corrientes de marea son más intensas; pero éstas se producen cada 15 días (en luna nueva y luna llena) y no se trataba de unas mareas vivas excepcionales (luna nueva 17 de agosto, máxima pleamar viva el 19 de agosto), tal como se puede ver en la imagen 33. Eso sí, la mayor parte de las incidencias se reportan a partir de las 17:00 (hora solar) de la tarde del 21 de agosto, es decir, cuando la marea empezaba a bajar, lo que podría explicar la intensificación de las corrientes de resaca.

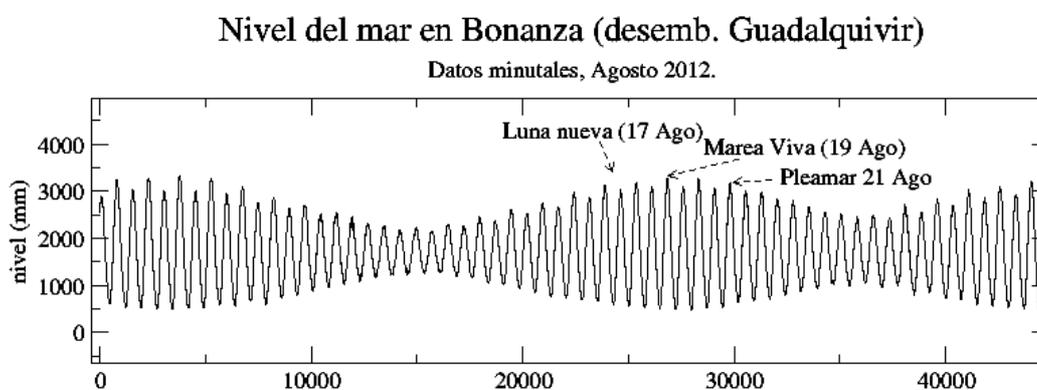


Imagen 33. Datos registrados por el mareógrafo de Bonanza para todo el mes de agosto. Se observa que los niveles de marea son altos pero no fuera de lo normal en mareas vivas..

Tanto el sistema de previsión de nivel del mar como los datos registrados de nivel por los mareógrafos durante los días 21 y 22 de agosto muestran niveles esperables en toda la zona, sin superar en ningún momento el nivel de alerta 1 (normalidad). Esto es coherente con lo descrito anteriormente respecto a las buenas condiciones meteorológicas. De hecho, las altas presiones dieron lugar a niveles del mar ligeramente inferiores a los previstos por la marea astronómica (tabla 6), hasta 5 cm por debajo de la misma, es decir, el residuo meteorológico tanto observado como medido fue nulo o negativo. Los niveles máximos registrados fueron de 3,57 m en Huelva, 3,17 m en Bonanza y 1,36 m en Tarifa, durante la pleamar de la tarde del día 21. Esta pleamar o máximo observado el día 21 se adelantó muy poco a la previsión de marea en Huelva (unos 10 minutos), y se retrasó unos 5 minutos en Bonanza.

Tabla 6. Hora y altura de las pleamares y bajamares (componente astronómica) previstas en los puertos de Huelva, Bonanza (Sevilla) y Tarifa para los días 21 y 22 de agosto de 2012. Hora solar o UTC y niveles sobre el cero de referencia en el puerto.

Huelva	Hora nivel	Hora nivel	Hora nivel	Hora nivel
21 agosto M	04:22 3,53	10:12 0,65	16:42 3,59	22:38 0,69
22 agosto X	05:05 3,42	10:56 0,79	17:27 3,41	23:22 0,88

Bonanza	Hora nivel	Hora nivel	Hora nivel	Hora nivel
21 agosto M	04:26 3,17	11:01 0,71	16:46 3,25	23:29 0,77
22 agosto X	05:08 3,07	11:42 0,79	17:32 3,07	

Tarifa	Hora nivel	Hora nivel	Hora nivel	Hora nivel
21 agosto M	03:52 1,40	09:13 0,20	16:10 1,41	21:36 0,23
22 agosto X	04:37 1,34	09:55 0,26	16:57 1,34	22:23 0,29

De lo anterior se desprende que los datos y sistemas de previsión de Puertos del Estado no recogen el adelantamiento de una hora en la pleamar y la subida del nivel del mar de más de 50 cm que en el apartado de análisis de efectos y daños se menciona para Sanlúcar de Barrameda, muy próximo a Bonanza (véase apartado 3.1.3). Esto podría ser debido a que se trataba de una sobre elevación producida por el oleaje entrante (*set-up* de oleaje) con un efecto más localizado. El sistema NIVMAR no tiene en cuenta el efecto del oleaje en el nivel del mar y la resolución de la malla es insuficiente (10x15 minutos). Sin embargo es extraño que no se registrase esto en el mareógrafo de Bonanza, bastante próximo.

Niveles registrados 21-22 de Agosto de 2012.

(datos minutales, referencia: cero de cada puerto)

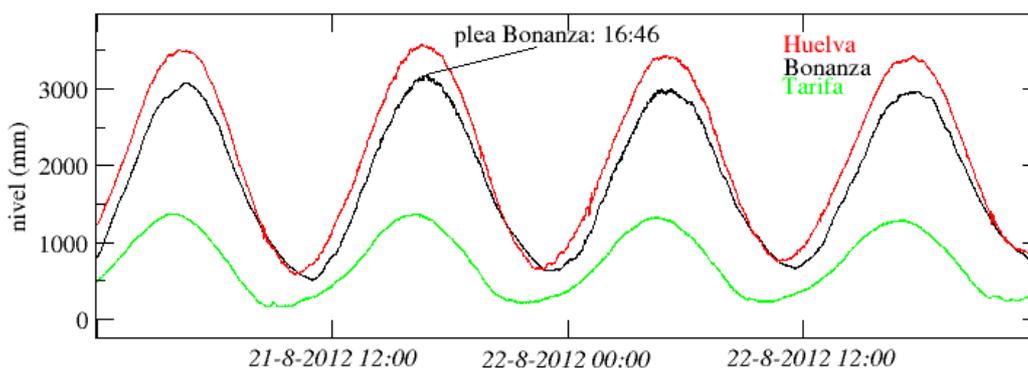


Imagen 34. Niveles registrados por los mareógrafos REDMAR en la zona (datos cada minuto). Niveles respecto al cero o referencia de cada puerto.

Con respecto a los parámetros de agitación y onda larga registrados por los mareógrafos, tampoco se registran valores especialmente anómalos. La alerta de tsunami o meteo-tsunami por tanto no superó el nivel 1. En la imagen 35 se pueden observar las

oscilaciones de alta frecuencia de los mareógrafos de Huelva y Bonanza. Como se ve (imagen 35), durante los días 21 y 22 la variabilidad es similar o inferior a otros momentos del mes (con amplitudes de menos de 5 cm).

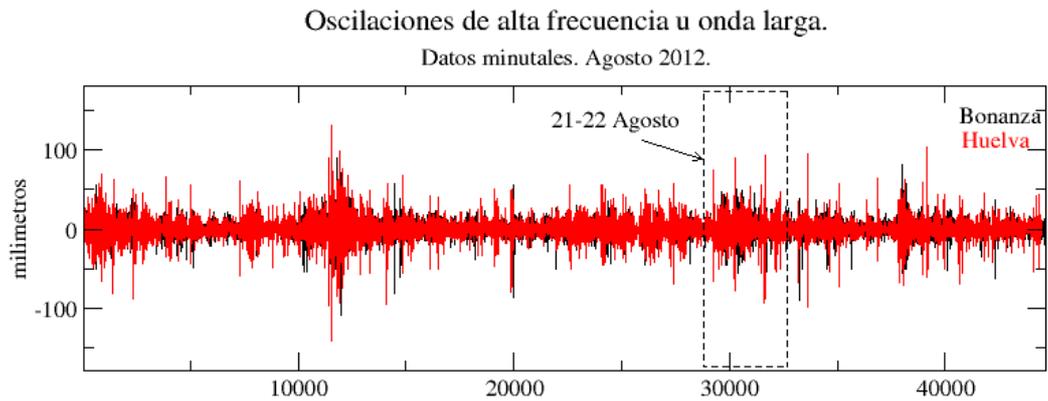


Imagen 35. Oscilaciones de alta frecuencia en el nivel del mar (períodos superiores a 2 minutos) en Huelva y Bonanza durante el mes de agosto.

4. Análisis numérico del huracán Gordon y diagnóstico de sus efectos hidrodinámicos en las costas de Cádiz.

El huracán Gordon (2012), pertenece a la familia de huracanes del Atlántico norte que se trasladan con una dirección predominante de oeste a este y que logran sobrepasar el límite geográfico de 26° W, logrando evolucionar energéticamente desde su formación como tormentas tropicales a huracanes por debajo de la categoría 3 (en la escala de Saffir-Simpson), llegando a establecer vientos sostenidos superiores a 200 km/h.

Dicha familia de huracanes se caracteriza por tener una presencia histórica inusual y estadísticamente baja, presentando de 1 a 3 eventos ciclónicos por década (basado en la base de datos HURDAT, 1850-2012), siendo los más representativos los huracanes Carrie (1957, categoría 1), Hannah (1959, categoría 2), Debbie (1961, categoría 1), Fran (1973 categoría 1), Emmy (1976, categoría 1), Floyd (1993, categoría 1), Vince (2005, categoría 1) y Gordon (2006, categoría 1).

Según el informe oficial del huracán Gordon (NHC, 2012), el evento alcanzó la categoría 2 y se debilitó a categoría 1 al alcanzar la isla de Santa María en las Azores, Portugal (imagen 36), llegando a causar inundaciones menores en diversas zonas costeras de este archipiélago, registrando caída de árboles, cortes de energía y deslizamientos de tierra, sin llegar éstas a significar pérdidas materiales significativas ni muertes. La imagen 36 muestra el *best-track* para el huracán Gordon.

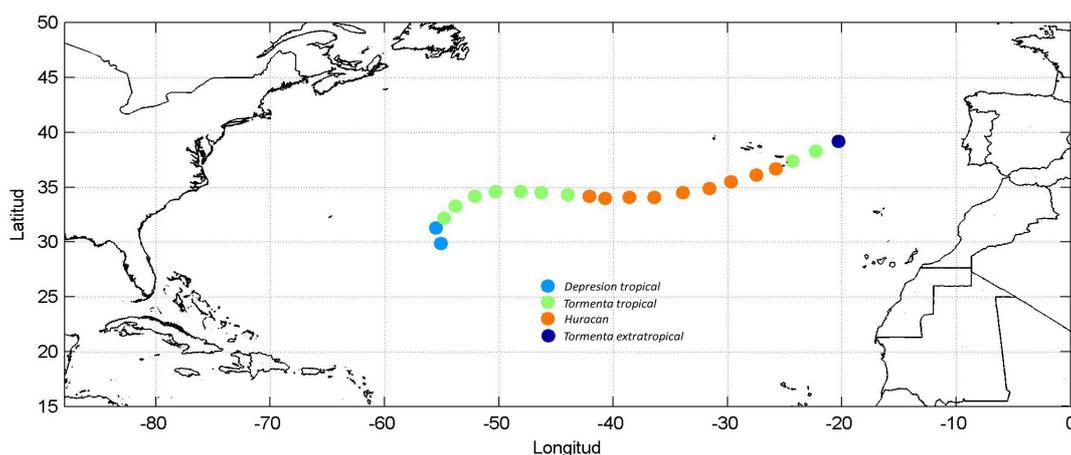


Imagen 36. Posiciones temporales (*best-track*) para el huracán Gordon, agosto de 2012.

Se presume que el huracán Gordon fue el causante directo de un súbito e inusitado comportamiento en la hidrodinámica litoral a lo largo de las costas de Cádiz, relacionado con la observación en costa de estados de mar de baja severidad $H_s \approx 1$ m, períodos altos alrededor de $T_p \approx 14$ s, y generación de corrientes de retorno de alta energía, cuya virulencia

llegó a comprometer el uso seguro de los bañistas en la costa entre los días 21 y 22 de agosto de 2012, lo cual obligó a una actuación urgente e improvisado de los equipos de rescate y salvamento.

Este comportamiento atípico en las corrientes litorales se atribuye a un forzamiento energético derivado del paso de dicho huracán a lo largo del Océano Atlántico nororiental, cuyas características propias implicaron una radical modificación en el ordenamiento de la energía espectral del oleaje incidente frente a la zona costera de Cádiz antes y después del paso del ciclón.

En este capítulo se describe la metodología de validación de un sistema de modelos numéricos acoplados para poder generar, propagar e interactuar en costa el oleaje asociado al evento del huracán Gordon. En el apartado 4.1 se describen las características de los datos de viento sinóptico y oleaje instrumental empleados para forzar y validar el modelo numérico SWAN (Zijlema, 2010), prestando especial atención en la adaptación de los campos de viento para una adecuada definición del huracán. En el apartado 4.2 se describe el uso y la implementación de los modelos SWAN y MOPLA (González et al., 2007), prestando especial interés en el diseño de los dominios numéricos, con base en los contornos costeros y batimétricos. En el apartado 4.3 se presentan los resultados de las simulaciones sobre la generación y propagación del oleaje en la zona frente a las costas de Cádiz, el análisis e interpretación de los espectros de oleaje obtenidos en distintas zonas oceánicas y costeras, su validación y tratamiento de los forzamientos para poderlos propagar hacia la costa. En el apartado 4.4 se presentan los resultados tras la propagación del oleaje en costa a través de la implementación y acoplamiento del modelo numérico MOPLA, obtención de mapas de altura de ola y corrientes de rotura. Finalmente en el apartado 4.5 se presentan las conclusiones del análisis numérico.

4.1. Datos de partida y modelos utilizados.

Conforme el huracán Gordon fue propagándose a lo largo del Atlántico nororiental, diversos equipos instrumentales desplegados en la zonas costeras y oceánicas lograron medir la historia temporal del oleaje, lo cual supone una valiosa información que permite identificar la evolución y desarrollo de esta variable y su generación por la acción del viento de alta energía, que actúa sobre la superficie del océano durante los días anteriores y posteriores a la tormenta. En este apartado se presentan las características generales de los datos instrumentales y numéricos, que describen a las mediciones del oleaje y los campos de viento respectivamente, empleados para el trabajo de validación y forzamiento del modelo numérico SWAN. Adicionalmente, este apartado recoge la metodología de pre-tratamiento de los campos de viento para una adecuada confección del forzamiento e implementación de estos al modelo SWAN.

4.1.1. Batimetría.

Para la implementación en este estudio, se han considerado los datos batimétricos de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico de la Marina Española números 443, 444 y 445, integradas con la información batimétrica del GEBCO, cubriendo el dominio espacial de longitud $65^{\circ} \text{ W} \rightarrow 5^{\circ} \text{ W}$ y latitud $25^{\circ} \text{ N} \rightarrow 43^{\circ} \text{ N}$, para de esta forma poder cubrir la totalidad de la zona costera de Cádiz desde Sanlúcar de Barrameda, al norte, hasta Tarifa, al sur, cubriendo una longitud de costa aproximada de 100 km (imagen 37).

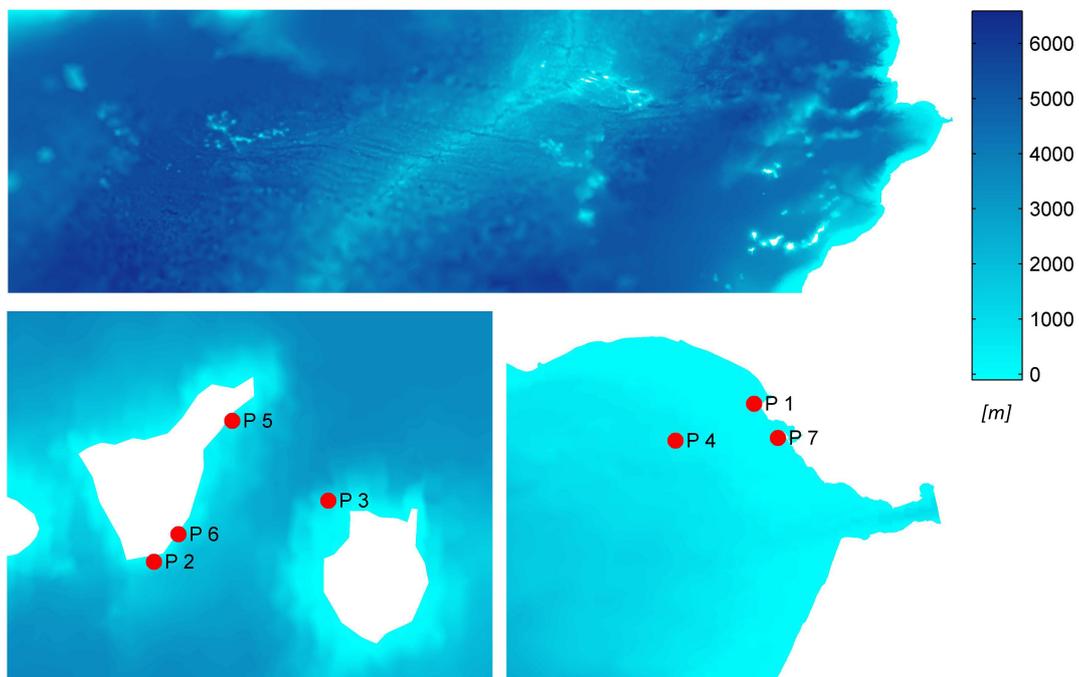


Imagen 37. Batimetría aportada por el GEBCO + cartas náuticas, para el dominio espacial longitud $65^{\circ} \text{ W} \rightarrow 5^{\circ} \text{ W}$ y latitud $25^{\circ} \text{ N} \rightarrow 43^{\circ} \text{ N}$, y localización de las boyas aportadas por Puertos del Estado.

4.1.2. Datos instrumentales de oleaje.

Puertos del Estado posee en la actualidad varios tipos de sensores de medidas oceanográficas situados a lo largo de la costa española. Los primeros que se instalaron fueron Boyas Escalares de Medida de Oleaje dentro del programa REMRO (Ruiz A. et al., 1995) que consisten en 21 boyas escalares fondeadas desde 1981. A finales de 1987 se comenzó una campaña de medida por medio de boyas direccionales para, además de los parámetros escalares, incorporar información direccional y meteorológica, evolucionando a nueva red direccional denominada red costera o REDCOS.

Las Boyas de Medida de Oleaje se instalaron con la idea de que se mantuvieran en sus lugares de fondeo de forma indefinida, proporcionando series temporales de oleaje cuya utilidad crece con los años.

Las boyas escalares recogen en cada registro una serie de elevaciones del oleaje sobre el nivel medio del mar, mientras que las direccionales recogen cuatro series: elevación, balance, cabeceo y compás. Actualmente la red está compuesta por boyas escalares de tipo Waverider (Datawell) y de boyas direccionales de tipo Triaxys (Axys). En julio de 2010 estaba constituida por 25 estaciones de las cuales 14 son boyas direccionales Triaxys.

Adicionalmente, el ente público de Puertos del Estado en España cuenta con una red de medidas de oleaje en aguas abiertas denominada red exterior o REDMAR, la cual proporciona datos de oleaje en tiempo real en aguas profundas, y tiene como el conocimiento del clima marino en aguas profundas y en tiempo real y el forzamiento y validación de modelos de propagación de oleaje.

La tabla 7 aporta los detalles de localización y fondeo de las boyas empleadas en el presente estudio (imagen 37), las cuales se encuentran en las proximidades del paso del huracán Gordon, tanto para aguas abiertas como para las zonas costeras de las Islas Canarias y Cádiz. Todas ellas lograron medir las series temporales de oleaje para todo el mes de agosto de 2012.

Tabla 7. Información de la localización y fondeo de las boyas costeras y exteriores utilizadas para el proceso de validación del oleaje derivado del huracán Gordon (2012).

ID	Estación	Profundidad (m)	Latitud (°N)	Longitud (°W)
P 1	Sevilla	10	36,740	6,480
P 2	Tenerife Ext	710	28,000	16,580
P 3	Gran Canaria Ext	780	28,200	15,800
P 4	Golfo de Cádiz Ext	450	36,480	6,970
P 5	Santa Cruz	56	28,460	16,230
P 6	Granadilla	22	28,090	16,470
P 7	Cost-Cadiz	22	36,500	6,330

4.1.3. Datos numéricos de viento oceánico de media resolución.

Los datos numéricos o de reanálisis de viento son necesarios para el estudio del clima marítimo a través de uso como forzamiento de los modelos oceánicos de propagación del oleaje. En particular, el reanálisis de oleaje está condicionado por la disponibilidad de reanálisis atmosféricos, más concretamente de vientos en superficie (a 10 m de altura sobre el nivel medio del mar, *W*).

Las bases de datos procedentes de reanálisis numérico atmosférico constituyen una fuente de información muy valiosa, ya que permiten el estudio de la evolución en el tiempo de las diferentes variables relacionadas con el oleaje, que de otra forma no se dispone de registros suficientemente largos (p. ej. datos instrumentales).

No obstante, el modelado de la circulación atmosférica a nivel global presenta una resolución espacial y temporal de baja a media resolución (entre 1,125° y 2,5° con resoluciones temporales de entre 3 y 6 horas, cubriendo períodos de tiempo de entre 20 y 60 años), lo cual puede suponer una desventaja en la definición de procesos que se desarrollan a una escala espacio-temporal de alta resolución como los eventos de huracán.

Actualmente, los reanálisis globales más populares son el ERA-40, desde 1957 hasta el 2002, y el ERA-Interim, desde 1989 hasta la actualidad. Ambos realizados por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF): el JRA-25, desde 1979 hasta la actualidad, de la Japan Meteorological Agency (JMA), y el NCEP/NCAR Reanalysis Project (Kalnay et al., 1996), desde 1948 hasta la actualidad, realizado por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR). Este último es uno de los reanálisis globales que cubren un mayor período de tiempo.

En este estudio se han utilizado los campos de vientos 6-horarios del reanálisis denominado ERA-Interim por ser la serie de datos con mejor asimilación de datos instrumentales a partir de información satelital.

4.1.4. Datos numéricos de viento de alta resolución asociado a huracanes.

En los últimos tiempos, los estudios que se encargan de evaluar numéricamente la generación del oleaje por eventos de huracán (Smith et al., 2001; Palmsten y Sallenger, 2001; Powell et al., 2010; Dietrich et al., 2010 y 2011; Kennedy et al., 2011; y Bunya et al., 2010) emplean la información proveniente de la base de datos H*WIND (Powell et al., 1998), donde a través de los campos de viento y presión desarrollados por la empresa Oceanweather Inc. (OWI), con una combinación óptima de la capa límite planetaria (PBL) modelada (Thompson y Cardone, 1996) para las presiones y los análisis cinemáticos realizados por la Hurricane Research Division (HRD), todo ello desarrollado a partir de mediciones de viento para los eventos de huracán (Bender et al., 2013).

Esta base de datos permite obtener los campos de viento de alta resolución disponibles para todos los eventos de huracán desde el año 1993. Todos los mapas de viento son válidos para forzar adecuadamente modelos numéricos de propagación de oleaje y marea meteorológica.

Sin embargo la base de datos H*WIND no recoge todos los huracanes ocurridos a lo largo de los años, siendo este el caso del huracán Gordon de 2012, ya que el área de actuación de este evento superó los límites espaciales del proyecto H*WIND, desplazándose hacia longitudes excesivamente orientales. Es por este motivo que en el presente trabajo se ha

optado por la obtención alternativa y uso de los campos de presión y viento basados en el modelo paramétrico Hydromet-Rankin Vortex presentado por Holland (1980) y Bretschneider (1990).

Este modelo ha sido implementado y validado con datos de boyas y satélites de radar de apertura sintética transmitidas por varios acontecimientos históricos de huracanes (Silva et al., 2002; Lehner et al., 2006; Powell et al., 1998; y Díaz-Hernández et al., 2012). Los modelos se describen en el Anejo I.

La imagen 38 muestra un ejemplo de la validación de las series de presión y el viento obtenidas con el modelo paramétrico para el paso del huracán Gordon sobre dos estaciones meteorológicas localizadas en las Islas Azores, concretamente en las estaciones de la isla de Ponta Delgada y en el aeropuerto de Santa María en la isla Vila Do Porto, datos extraídos del informe del Deutscher Wetterdienst DWD (Haeseler, 2012).

Se puede ver en la imagen 38 que se obtiene un adecuado acuerdo entre los datos medidos de la presión y viento entre ambas fuentes de datos, el modelo paramétrico y las mediciones instrumentales.

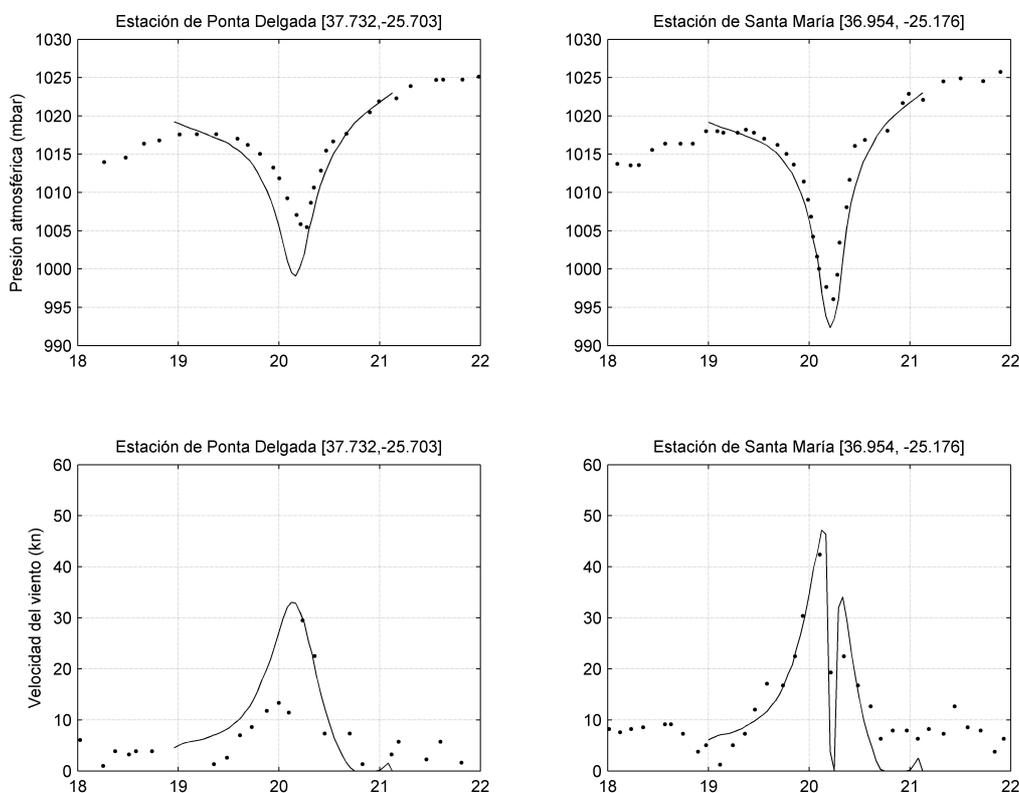


Imagen 38. Presión y series temporales de viento obtenidos con el Hydromet-Rankin Vortex (línea), y medición en estación meteorológica (puntos).

4.1.5. Datos numéricos de viento de alta resolución asociado a huracanes.

Como se ha comentado en el apartado 4.1.2, el principal inconveniente que presentan los campos de viento provenientes de reanálisis globales se desprende de su resolución espacio-temporal, la cual hace que no se resuelvan bien fenómenos de dimensiones reducidas que requieren una alta resolución para una adecuada descripción en su geometría tridimensional, tal como ocurre con los huracanes, cuyas características morfológicas (ojo, gradiente de máximos vientos y asimetría por traslación) se concentran en un área no superior a los 100x100 km.

Para solventar este problema en el presente estudio se propone el acoplamiento, integración y fusión de los campos de viento de media escala (base de datos ERA-Interim) con los mapas de viento de alta resolución obtenidos de la formulación paramétrica expuesta en el apartado 4.1.3.

El objetivo de este tratamiento es poder adecuar el forzamiento del modelo de propagación de oleaje SWAN con campos de viento realistas en todo el dominio numérico a través de la fusión de ambas fuentes de datos: campos de viento de media resolución provenientes de la base de datos ERA-Interim y campos de viento de huracán de alta resolución provenientes del modelo paramétrico.

Para llevar a cabo esta tarea se debe determinar el umbral de integración entre ambas fuentes de datos para que la fusión presente una continuidad adecuada en los valores y direcciones del viento. Esto se realiza considerando una función radial de decaimiento de viento (ecuación 1) que se aplica en el borde exterior del campo de vientos paramétrico de alta resolución, de tal forma que la fusión entre los vientos de alta resolución y los vientos de media resolución no presenten discontinuidades ni cambios abruptos en su interfaz. La ecuación de decaimiento que se propone es la siguiente:

Ecuación 1

$$d = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{\alpha \cdot L} \cdot x\right) + \frac{1}{2}$$

donde α es un factor que define la pendiente del decaimiento del gradiente de viento; L es el radio de inicio del umbral de la función de decaimiento medida desde el centro del huracán (en grados geográficos); x es el dominio de aplicación de la función que va desde $L < x < (\alpha \cdot L)$ (en grados geográficos).

La imagen 39 muestra la función de decaimiento para un valor de $L = 5^\circ$ y una variación del valor α . La función de decaimiento que debe ser aplicada de forma radial y multiplicada por el campo de vientos de alta resolución, con referencia al centro del huracán.

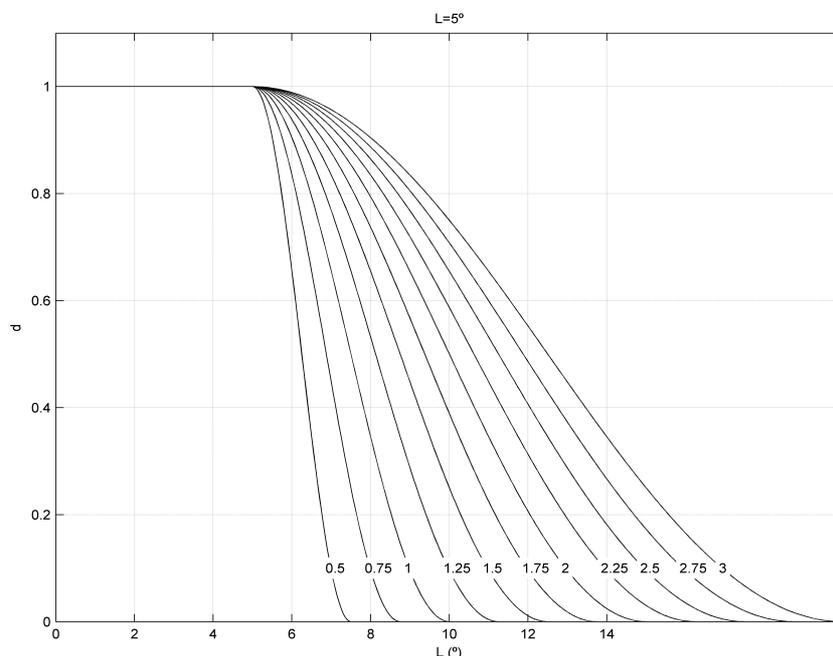


Imagen 39. Función de decaimiento radial que afecta al campo de vientos de alta resolución.

Tras diferentes pruebas de sensibilidad y adaptación de los campos de viento fusionados, se recomienda el límite de inicio del decaimiento en $L = 5^\circ$ como valor estándar, ya que se asemeja a las dimensiones del dominio de $10^\circ \times 10^\circ$ que la base de datos H*WIND propone y corresponde a la distancia media en donde los valores del viento presentan en general valores por debajo de los 5% del viento máximo obtenido.

Adicionalmente se ha visto que con valores de $1 < \alpha < 2$ se obtiene una fusión adecuada y numéricamente estable tras diversas pruebas de aplicación del modelo SWAN.

Una vez afectado el campo de vientos de alta resolución por la función de decaimiento radial, esta puede sustituir el campo de vientos de media resolución para aquellos valores aportados por el modelo paramétrico que queden por encima de esta.

La imagen 40 muestra un ejemplo del resultado comparativo para la fecha de 19 de agosto de 2012 a las 11:00 entre el campo de vientos de media resolución y el resultado tras su fusión con el campo de vientos de alta resolución una vez aplicada la función de decaimiento.

Es importante mencionar que, previo a realizar la fusión entre ambos campos de viento, la base de datos de media resolución debe ser interpolada espacialmente a una malla más fina (p. ej. con una resolución $Dx = Dy = 0,05^\circ$), y temporalmente cada hora para ser coherentes con la información obtenida con el modelo paramétrico de alta resolución. De esta forma se garantiza una homogeneidad del forzamiento final obtenido tanto en el espacio como en su evolución temporal cada hora.

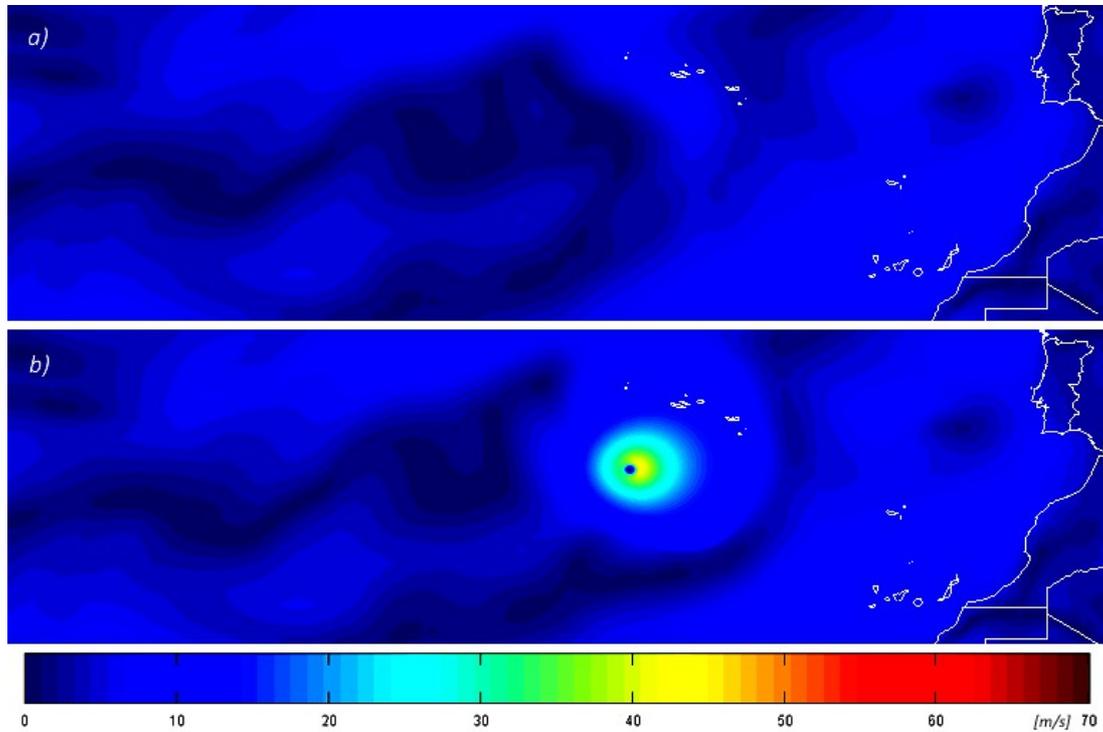


Imagen 40. Ejemplo del trabajo de preparación y fusión de los campos de viento (en km/h) de: a) media resolución (ERA-Interim) y b) media + alta resolución (ERA-Interim, + modelo paramétrico) para el 19 de agosto de 2012 a las 11:00 en el dominio espacial longitud 65° W \rightarrow 5° W y latitud 25° N \rightarrow 43° N.

Adicionalmente, la fusión entre ambas bases de datos permite realizar un diagnóstico numérico comparativo del aporte energético en el espectro del oleaje en cualquier punto de estudio, con y sin la fusión de los vientos de alta resolución.

4.2. Modelos numéricos: descripción e implementación.

En este apartado se describen de manera general las ecuaciones, uso e implementación de los modelos SWAN (Booij et al., 1999) y MOPLA (González et al., 2007), presentando adicionalmente el diseño de los dominios numéricos con base en los contornos costeros y batimétricos.

4.2.1. Modelo SWAN.

El modelo SWAN predice la evolución de la acción del espectro de oleaje $N(x, t, \sigma, \theta)$, en el espacio geográfico x y temporal t , considerando la frecuencia relativa σ y la dirección del oleaje θ , gobernadas por la ecuación de balance siguiente (Booij et al., 1999):

Ecuación 2

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot [(C_g + U)N] + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

donde los términos de lado izquierdo de la ecuación 2 corresponden al cambio de la acción del oleaje con respecto al tiempo y propagación en el espacio x , siendo ∇_x el operador gradiente en el área geográfica, C_g la celeridad de grupo, y U el campo vectorial de corrientes.

El modelo SWAN es capaz de reproducir adecuadamente los fenómenos de refracción y asomeramiento a lo largo de la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la zona costera en función de la variación espacial del fondo y corrientes, considerando la tasa de cambio en la fase C_σ y la tasa de giro C_θ .

El término S_{tot} representa el crecimiento del oleaje por la acción del viento sobre la superficie del océano, disipación por *whitecapping*, rotura de oleaje y fricción con el fondo.

En el presente estudio se ha usado la versión en malla no estructurada del modelo SWAN presentada por Zijlema (2010), con la evidente ventaja de poder optimizar los recursos computacionales a través de una óptima definición del modelo numérico en consonancia con las características del forzamiento de viento utilizado.

Es importante mencionar que el uso del modelo SWAN no se recomienda para el análisis de los procesos de propagación de oleaje menores a una escala de una longitud de onda, donde se presentan procesos que requieren una mejor definición de malla, una adecuada representación de los contornos batimétricos y topográficos de la región de estudio.

Para llevar a cabo la simulación numérica del huracán Gordon se ha planteado en este estudio un dominio numérico rectangular que cubra las coordenadas longitud $65^\circ \text{ W} \rightarrow 5^\circ \text{ W}$ y latitud $25^\circ \text{ N} \rightarrow 43^\circ \text{ N}$, sobre el cual se proyectan los contornos costeros e islas (fuente: NOAA, *shoreline/coastline data*), así como la información batimétrica utilizada (fuente: General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO, con una resolución de $0,5^\circ$).

A fin de optimizar el número de elementos triangulares de la malla no estructurada para el modelo SWAN, y al mismo tiempo describir adecuadamente los campos de viento del huracán de alta resolución, se ha diseñado una malla que concentra sus elementos a lo largo de la trayectoria del huracán, considerando un tamaño mínimo de elemento correspondiente aproximadamente a $0,05^\circ$ (imagen 41).

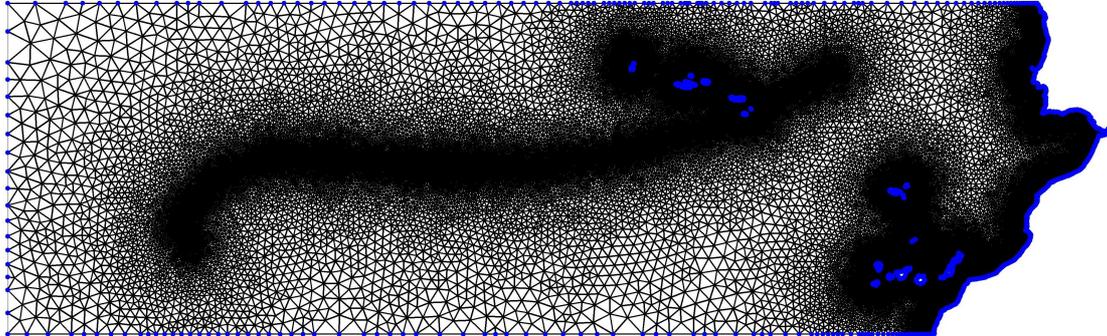


Imagen 41. Dominio espacial: longitud 65° W → 5° W y latitud 25° N → 43° N usado por el modelo SWAN para la malla de elementos triangulares no estructurados.

4.2.2. Modelo MOPLA.

El modelo MOPLA es una herramienta que permite el estudio de la evolución morfológica de las zonas costeras. Se basa en el estudio de los procesos individuales de oleaje, corrientes y transporte de sedimentos, en el ámbito 2DH. El modelo consta de tres módulos acoplados: el módulo de transformación de onda (OLUCA), el módulo de corrientes de rotura promediadas en vertical (COPLA) y el módulo de transporte de sedimentos y la evolución morfológica (EROS). En el presente estudio se han empleado únicamente los módulos OLUCA y COPLA.

El módulo OLUCA es un modelo promediado en la fase de onda que permite la resolución de los fenómenos de alta resolución en costa (a una escala no admitida por el modelo SWAN) de refracción, asomeramiento, difracción y rotura, teniendo en cuenta los efectos débilmente no lineales que experimenta el oleaje en aguas someras, a través de la propagación de espectros de oleaje direccionales sobre un fondo batimétrico real.

Adicionalmente, el modelo OLUCA tiene en cuenta los efectos de disipación de energía por fricción en el fondo y rotura.

El modelo se basa en la aproximación parabólica de la ecuación de pendiente suave (*mild slope equation*), propuesta inicialmente por Kirby y Dalrymple (1983) y Kirby y Özkan (1994), implementado en una malla regular y bajo un esquema numérico de diferencias finitas (ecuación 3).

Ecuación 3

$$\vec{\nabla} \cdot (C \cdot C_g \vec{\nabla} \eta) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \eta = 0$$

donde, C es la celeridad de la fase de la onda, C_g la celeridad de grupo, σ la frecuencia angular, y η es el desplazamiento de la superficie libre.

El modelo incluye las aproximaciones de rotura de oleaje en playa propuestas por Battjes y Janssen (1978), Thornton y Guza (1983), y Rattanapitikon y Shibayama (1998). El modelo OLUCA es una herramienta ingenieril muy eficiente debido a que requieren esfuerzos computacionales muy bajos, siendo ampliamente usados en el ámbito de la consultoría en la ingeniería de costas.

El módulo COPLA resuelve las ecuaciones de integración vertical de la conservación de masa y cantidad de movimiento en el ámbito 2DH, permitiendo la obtención de las corrientes vectoriales de rotura en playas a través de la interpretación de los tensores de radiación bidimensionales en costa aportados por el módulo OLUCA.

El modelo es capaz de operar con una interacción oleaje-corriente, teniendo en cuenta la rugosidad del terreno y las fluctuaciones turbulentas (viscosidad de remolino), derivadas a la rotura del oleaje.

El modelo bidimensional de corrientes en playa COPLA se deduce de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales se integran en la dimensión vertical y se promedian en un período de tiempo (en la fase del oleaje) en un sistema de coordenadas localizado en el nivel medio del mar. De esta forma se obtienen las ecuaciones de continuidad (ecuación 4) y de cantidad de movimiento (ecuación 5) siguientes:

Ecuación 4

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0$$

Ecuación 5

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xx}) + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{xy}) \\ + \frac{gU}{C^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} - \epsilon \left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned}$$

donde $H = \eta + h$: h es la profundidad, U es la componente de velocidad en el eje x , V es la componente de velocidad en el eje Y , S_{xy} los componentes del tensor de radiación, y ϵ la viscosidad de remolino. Una descripción detallada acerca de las formulaciones y la implementación se presenta en GIOC (2003).

Los mapas han sido digitalizados y las coordenadas geográficas han sido convertidas en coordenadas métricas con respecto a la proyección de Mercator UTM WGS-84 zonas 29S

y 30S. Además se dispone de información batimétrica de detalle para las playas de Cádiz, La Barrosa, Conil de la Frontera, El Palmar, Zahora, Barbate y Zahara de los Atunes.

En la imagen 42 se muestra la batimetría resultante de la integración de las distintas bases de datos interpolados en una misma malla con una resolución de 25 x 25 m, así como las cuatro mallas numéricas propuestas para realizar el análisis de la hidrodinámica en la zona costera de Cádiz, con la localización de sus correspondientes puntos de acoplamiento del oleaje entre los modelos SWAN y OLUCA. Los puntos topo-batimétricos han sido referenciados con respecto a la media de las más bajas mareas, que se denominará cota de la Bajamar Viva Equinoccial (BMVE). Las cotas de referencia de la BMVE con respecto al cero del Instituto Geográfico de la Marina (IGM) en la zona de estudio.

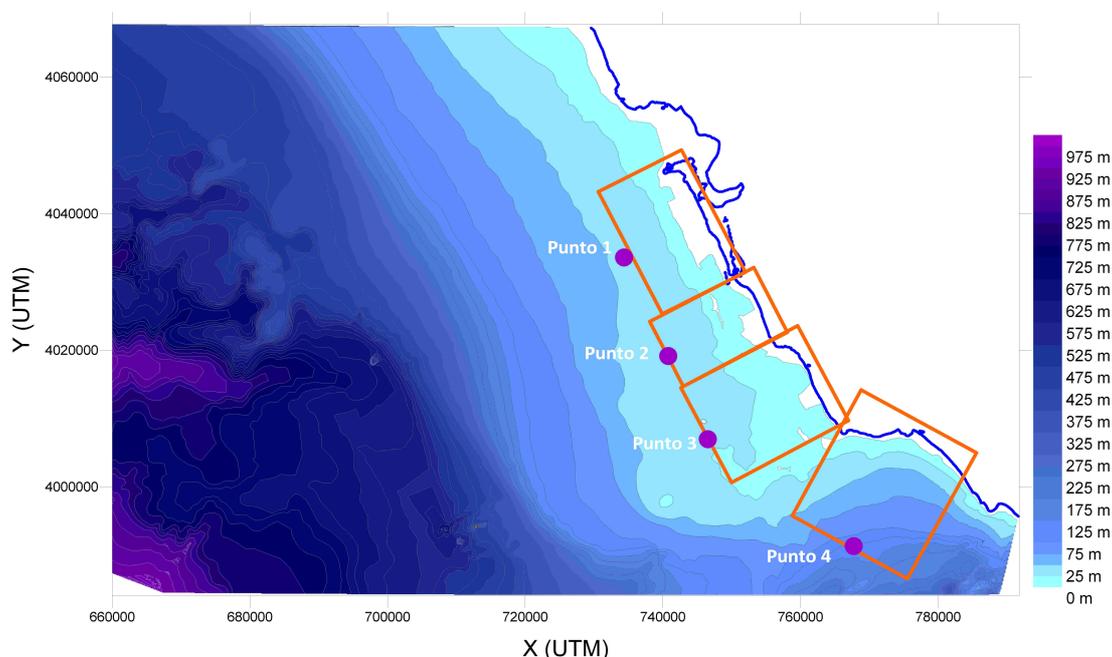


Imagen 42. Batimetría y mallas numéricas utilizadas por el modelo MOPLA para el análisis del oleaje y corrientes a lo largo de la costa de Cádiz.

4.3. Propagación numérica del oleaje asociado al evento de huracán Gordon 2012.

Para la ejecución del modelo SWAN para la malla no estructurada mostrada en la imagen 41 se tuvieron que adaptar los mapas de viento interpolados espacial y temporalmente en el dominio numérico predefinido, sin necesidad de realizar ningún trabajo previo de calibración de parámetros físicos como el coeficiente de arrastre o el número de iteraciones y error relativo entre estas. Se ha seleccionado el modelo de crecimiento de oleaje por la acción del viento local denominado GEN3 o modo de tercera generación de Janssen (1989), debido a que tal como se menciona en Huang et al. (2012), aporta valores mejores para vientos más

intensos por encima de 100 km/h en comparación con la aproximación de Komen et al. (1984).

La simulación realizada con el modelo SWAN aporta archivos de salida en forma de mapas de H_s , T_p , θ , viento y dirección del viento, así como los espectros de oleaje en cualquier punto dentro del dominio numérico.

El apartado 4.3.1 presenta mapas de resultados en el ámbito 2DH, los cuales permiten diagnosticar el comportamiento del oleaje y viento en el espacio geográfico y su evolución temporal en la ventana temporal de duración del evento del huracán.

El apartado 4.3.2 presenta gráficos de series temporales del oleaje obtenidos con la simulación del modelo SWAN, comparadas con respecto a las mediciones aportadas por las boyas oceánicas y costeras de Puertos del Estado descritas en el apartado 4.1.1 del presente estudio.

El apartado 4.3.3 analiza y discute la modificación que sufre el espectro de oleaje frente a las costas de Cádiz, estableciendo un hipotético análisis comparativo con un oleaje simulado sin la presencia del huracán.

4.3.1. Simulación del evento del huracán Gordon.

Se ha realizado una simulación con el modelo SWAN considerando un forzamiento no estacionario de viento, que representa la creación, evolución, propagación y disipación del huracán Gordon a partir del día 10 de agosto de 2012 hasta el día 28 del mismo mes. Se ha tenido en cuenta un incremento temporal $\Delta t = 10$ minutos como paso de tiempo del modelo SWAN para asegurar la estabilidad y convergencia del modelo. Se muestra la evolución de la altura de ola significativa H_s y período de pico T_p respectivamente para diferentes instantes de tiempo.

Se puede ver la evolución de la altura de ola significativa conforme evoluciona energéticamente el huracán Gordon (imagen 43), llegando esta a presentar altura de ola cercana a $H_s \approx 12$ m en la zona adyacente a la trayectoria del huracán.

Este aumento en la altura de ola cerca del centro del huracán no llega a propagarse hacia la zona costera de España en general y hacia la zona de Cádiz en particular, llegando a generar únicamente un oleaje inferior a $H_s < 2$ m en la zona del Golfo de Cádiz.

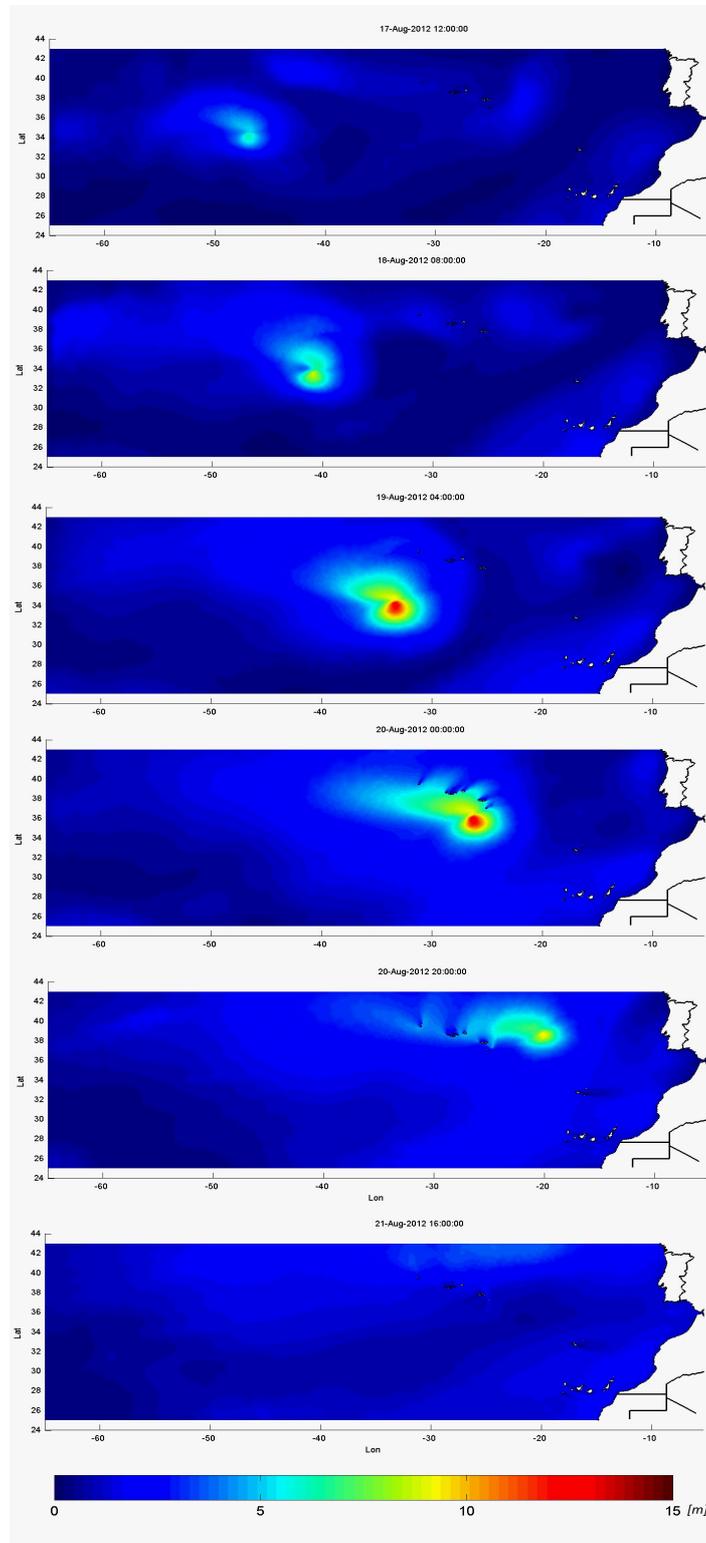


Imagen 43. Evolución de H_s para el huracán Gordon obtenido con el modelo SWAN.

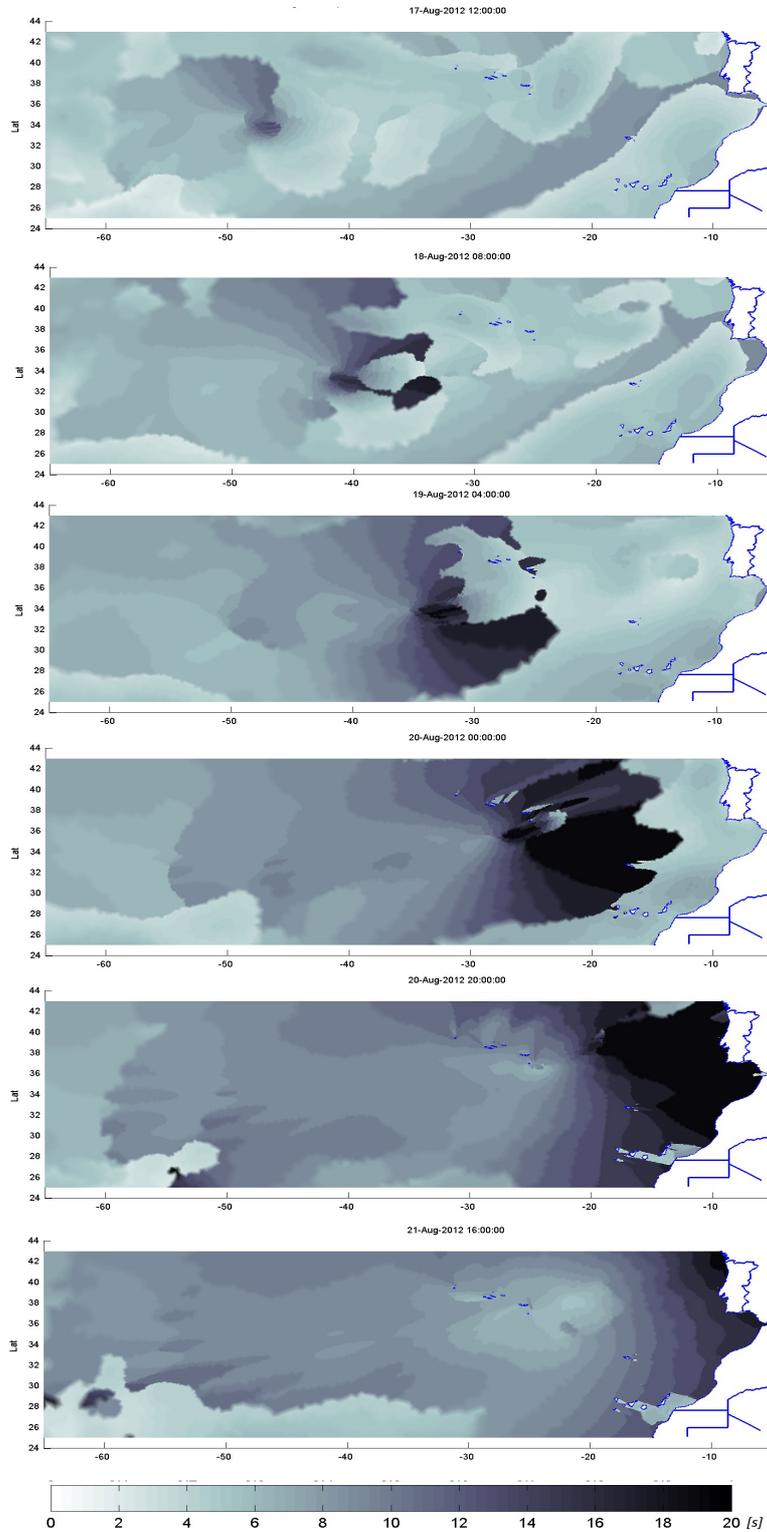


Imagen 44. Evolución de T_p para el huracán Gordon obtenido con el modelo SWAN.

Con respecto al período de pico (imagen 44), se observa que conforme el huracán comienza a trasladarse en dirección este, se comienzan a formar frentes espaciales de aumento de esta variable registrada numéricamente por el modelo SWAN. Se observa que a partir del 20 de agosto de 2012 dicho frente de aumento del período de pico comenzó a penetrar en el Golfo de Cádiz, llegando a inundar esta zona con períodos superiores a $T_p > 12$ s alcanzando la zona costera de Cádiz y la costa de Portugal a lo largo de las horas siguientes, presentando una disminución lenta de este mar de fondo a partir de la últimas horas del día 21 hasta el 24 de agosto de 2012, día en que se recobró un período de pico cercano a $T_p > 5$ s.

4.3.2. Comparación del modelo SWAN con datos instrumentales.

En el apartado 4.3.1 se han presentado los mapas de resultados de las simulaciones realizadas con el modelo SWAN en donde se ha podido apreciar la evolución espacio-temporal del oleaje asociado al evento del huracán Gordon.

En el presente apartado se realiza una validación de estos resultados a través del uso y comparación de la información aportada por el modelo SWAN con la información instrumental proveniente de las boyas oceánicas y costeras aportadas por Puertos del Estado (apartado 4.1.1). Se realiza por tanto una comparación de alturas de ola (altura de ola significativa y período de pico).

Como se comentó en el apartado 4.1, se han utilizado siete series temporales de oleaje instrumental proporcionadas por Puertos del Estado, medidas en siete localizaciones repartidas en el área de las Islas Canarias y en el Golfo de Cádiz, pertenecientes a la red de boyas oceánicas y costeras que esta entidad pública gestiona. Esta información ha sido recabada durante todo el mes de agosto de 2012, coincidiendo con el paso del huracán Gordon.

Las boyas proporcionan información horaria de los parámetros espectrales del oleaje, presentando mediciones continuas a excepción de la boya del Golfo de Cádiz, perteneciente a la Red Exterior, que únicamente logró medir datos de oleaje a partir del 24 de agosto de 2012 (véase apartado 3.2.1.2).

Las imágenes 45 y 47 presentan las series temporales de H_s y T_p simulados y medidos en las estaciones del área de las Islas Canarias y del Golfo de Cádiz, respectivamente.

Las comparaciones presentadas en la imagen 45 muestran una adecuada representación numérica de la altura de ola significativa y su evolución a lo largo del tiempo y en las cuatro estaciones localizadas en las Islas Canarias, en donde se puede ver que la posible influencia del huracán es poca o inexistente, debido a que la evolución en la magnitud de esta variable no muestra un aumento significativo y se mantiene con valores alrededor de 1,5 m.

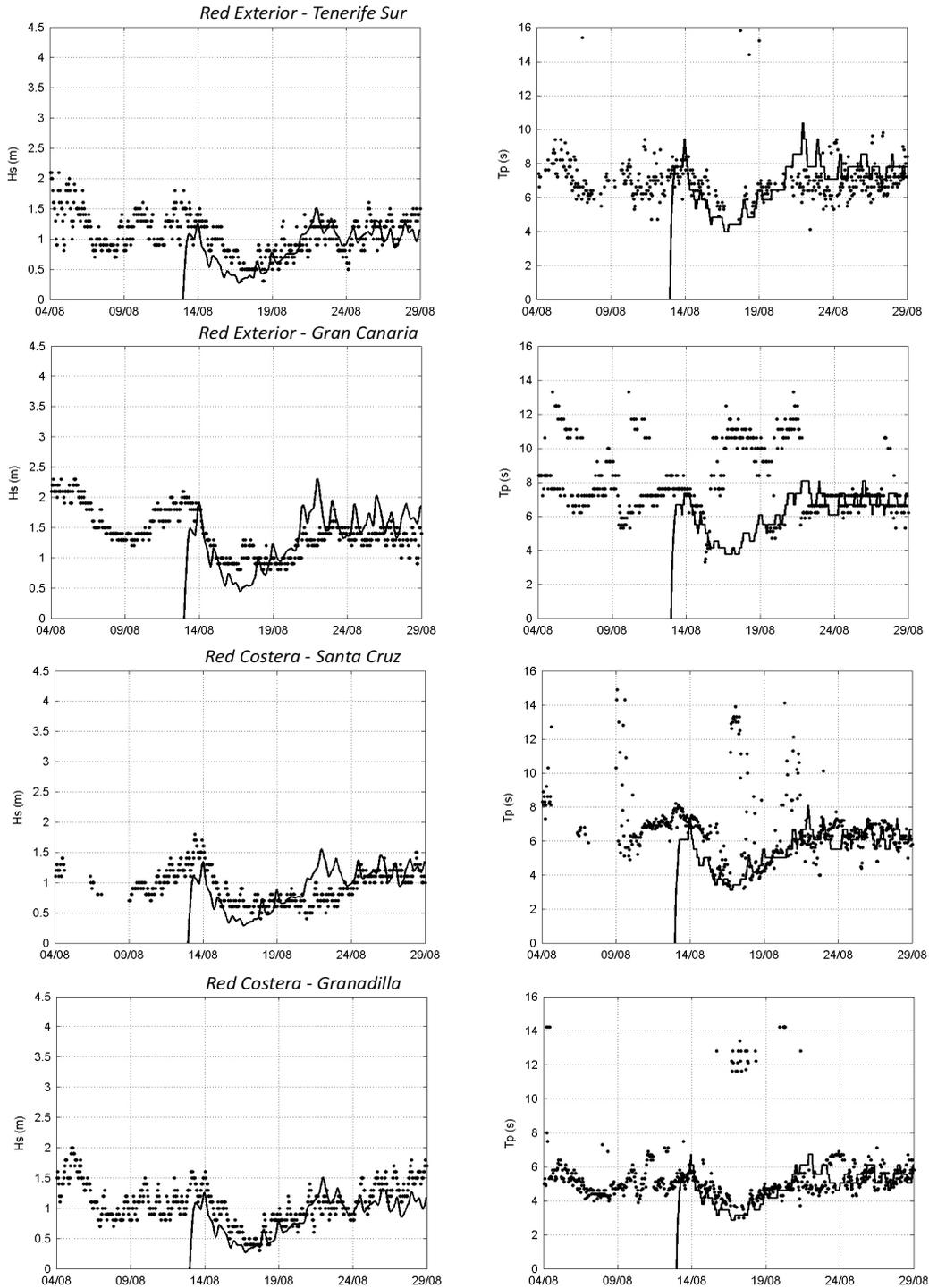


Imagen 45. Validación del oleaje aportado por el modelo SWAN con la información instrumental aportada por las boyas de Puertos del Estado en la zona de las Islas Canarias. Modelo numérico SWAN (línea) vs. serie instrumental (puntos).

Con respecto a la influencia en el período de pico en la zona de las Islas Canarias, se puede observar que la evolución general para esta variable aportada por el modelo numérico es adecuada y correcta; sin embargo se observa que para la boya de Gran Canaria (Red Exterior) y la Boya de Santa Cruz (Red Costera), los instrumentos registraron un aumento en el período de pico a partir del 16 de agosto de 2012, especialmente en la boya de Gran Canaria. Este repentino aumento en los valores de período de pico en estas dos boyas se debe a la influencia del mar de fondo generado por el huracán.

Sin embargo, el modelo numérico SWAN no es capaz de reflejar dicho aumento en sus resultados, seguramente debido a que el modelo es incapaz de gestionar adecuadamente los giros que experimenta el oleaje por efecto de la difracción de este al encontrarse con la isla de Tenerife, que actúa como elemento natural de bloque del oleaje proveniente del NW para el área oceánica entre dicha isla y la isla de Gran Canaria, zona en donde se encuentran las dos boyas mencionadas. Esta limitante en el modelo SWAN es ampliamente conocida y discutida en los documentos de desarrollo del modelo (Zijlema, 2010). Este efecto de sombra se puede apreciar perfectamente en la imagen 46, en donde se ha indicado la posición de la boya exterior de Gran Canaria.

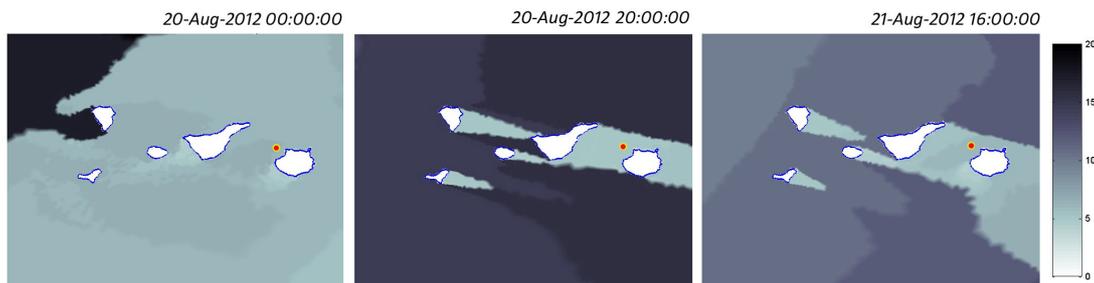


Imagen 46. Ejemplo de la propagación del período de pico en la zona de las Islas Canarias, coincidiendo con el paso del huracán Gordon.

La imagen 47 muestra la evolución del oleaje para las boyas costeras de Sevilla y Cádiz y la boya oceánica del Golfo de Cádiz.

Se aprecia que el modelo SWAN es capaz de reproducir adecuadamente la evolución de la altura de ola significativa para el evento del huracán Gordon, mostrando que los valores de este parámetro espectral muestran un aumento en su magnitud a partir del día 19 de agosto aproximadamente, alcanzando un aumento máximo de 1,5 m, coincidiendo con las mediciones instrumentales. Concluyendo que el aporte energético del huracán Gordon en la zona del Golfo de Cádiz es de alrededor de 1 m de altura de ola significativa, debido a que, como se puede observar en la imagen 47, los valores de H_s antes y después del evento eran de alrededor a 0,5 m, coincidiendo con las observaciones de Protección Civil, Policía Local y Cruz Roja, según información aportada por la International Association of Emergency Managers (IAEM, 2013).

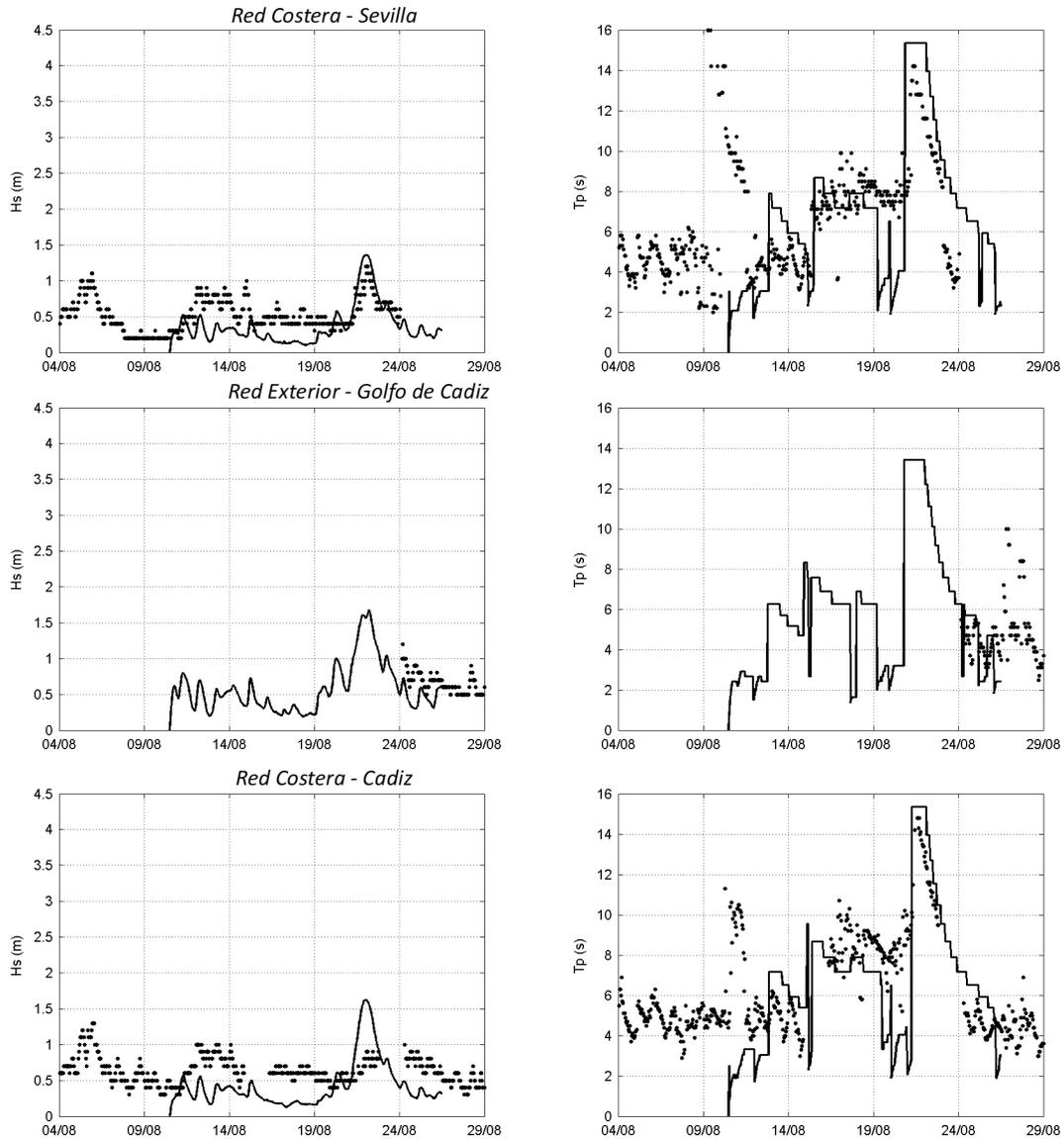


Imagen 47. Validación del oleaje aportado por el modelo SWAN con la información instrumental aportada por las boyas de Puertos del Estado en la zona del Golfo de Cádiz. Modelo numérico SWAN (línea) vs. serie instrumental (puntos).

Con respecto a la evolución del período de pico para esas mismas fechas, se puede apreciar que las boyas registraron un abrupto aumento en los períodos de pico por encima de 12 s, llegando a alcanzar en su evolución máxima un valor de 14 s para el día 21 de agosto de 2012.

Este aumento se presentó de forma brusca y súbita, alcanzando el valor máximo en pocas horas, para después mostrar una evolución decreciente o disminución del período de

pico a lo largo de los siguientes 3 días aproximadamente, para finalmente alcanzar los valores habituales de alrededor de 5 s en las tres boyas.

Esta evolución y comportamiento es perfectamente reflejado por el modelo SWAN, que aunque muestra un comportamiento más escalonado y abrupto que lo registrado por las boyas, logra modelar adecuadamente el comportamiento medio para el paso del huracán en el Golfo de Cádiz.

Finalmente, en la imagen 48 se ve el comportamiento y validación instrumental de la dirección media en la boya costera de Cádiz, en donde se aprecia que la dirección predominante de propagación del oleaje hacia la zona costera de Cádiz era del oeste, y que para los instantes temporales del paso del huracán Gordon, el valor de la dirección sufrió un giro de 60° hacia el sur (S), mostrando que a partir del día 21 de agosto y durante los 3 días siguientes los oleajes provenían de direcciones entre W, S10W. Se observa que el modelo SWAN gestiona adecuadamente el mencionado giro en las direcciones media de propagación.

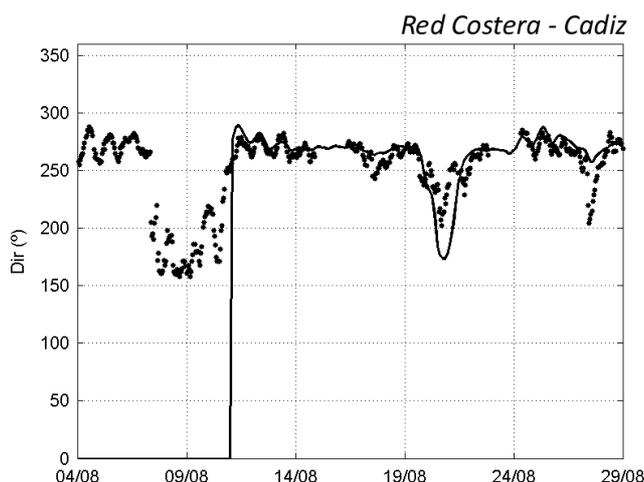


Imagen 48. Evolución de la dirección media de propagación de oleaje en la Boya Costera de Cádiz, comparación del modelo numérico SWAN (línea) vs. serie instrumental (puntos).

4.3.3. Análisis de la modificación espectral debida al huracán.

Finalmente, en el presente apartado se muestra el análisis de la información espectral registrada por el modelo numérico frente a la zona costera de Cádiz, concretamente en el punto 3 mostrado en la imagen 42, que corresponde al punto de acoplamiento entre el modelo SWAN y el modelo MOPLA, que será desarrollado en el siguiente apartado.

Dicho punto 3 se encuentra en las coordenadas $36,131^{\circ}$ N y $6,454^{\circ}$ W, sobre una profundidad aproximada de 30 m, y se considera representativo del clima marítimo en la zona de aguas intermedias del Golfo de Cádiz.

Como se ha mencionado en secciones anteriores, el modelo SWAN es capaz de aportar los resultados temporales del oleaje en forma de espectros direccionales de energía, lo cual supone una gran ventaja para el entendimiento de la transformación que sufre el oleaje antes y después del evento de huracán, y para una adecuado acoplamiento y forzamiento del modelo MOPLA que se encarga de evaluar numéricamente la hidrodinámica en la zona de rompientes.

En este estudio se han obtenido dichas series espectrales en los cuatro puntos de control mostrados en la imagen 42.

A fin de poder evaluar la evolución temporal del mar de fondo o aumento en el período de pico por efecto del paso del huracán Gordon, en la imagen 49 se muestra la evolución temporal de la información espectral (integrada en la dimensión direccional) para el punto 3 y para el paso del huracán Gordon, para dos simulaciones realizadas con el modelo SWAN: a) teniendo en cuenta el forzamiento del viento de media resolución (ERA-Interim + viento de alta resolución (modelo paramétrico), y b) únicamente viento de media resolución (ERA-Interim sin la presencia del huracán).

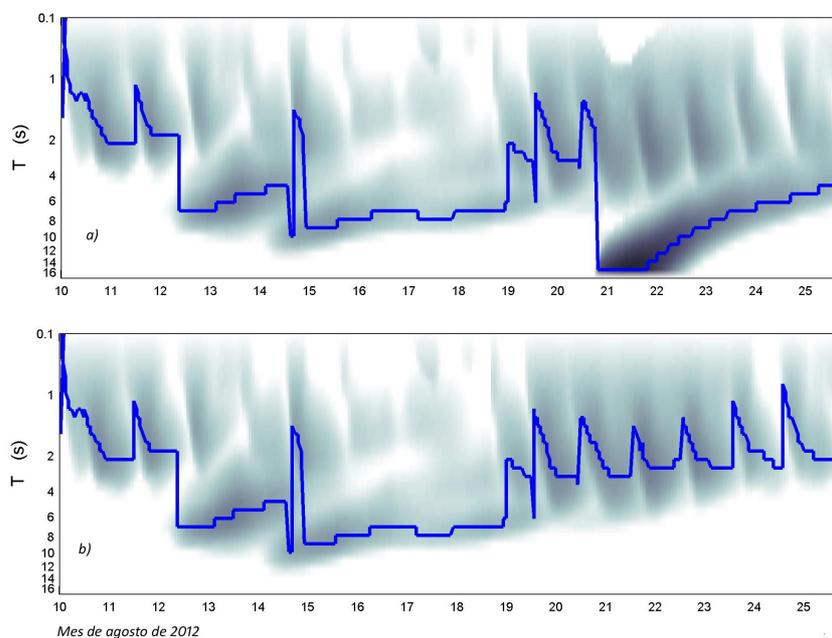


Imagen 49. Evolución del espectro de energía de períodos y del período de pico en el punto 3 ($36,131^{\circ}$ N, $6,454^{\circ}$ W), para: a) el forzamiento del viento de media resolución + viento de alta resolución, y b) únicamente viento de media resolución (sin la presencia del huracán). Evolución temporal del período de pico (línea azul).

En la imagen 49 se puede observar claramente que, tras el paso del huracán Gordon, el espectro de oleaje muestra un aumento significativo hacia períodos más altos, alcanzando el límite de los 14 s, con una concentración energética evidente, que se disipa o disminuye tras el paso del huracán en un lapso de 3 a 4 días.

4.4. Propagación numérica del oleaje y corrientes en la zona costera de Cádiz.

En este apartado se presenta el análisis numérico de la hidrodinámica en la zona de rompientes a lo largo de la costa de Cádiz, analizando el comportamiento del oleaje y corrientes en playa antes y después del paso del huracán Gordon en agosto de 2012. Para ello se emplean los módulos de propagación de oleaje (COPLA) y de evaluación de corrientes asociadas a la rotura del oleaje (COPLA), ambos dentro del modelo MOPLA.

En la imagen 42 se muestran los límites de las mallas numéricas diseñadas para llevar a cabo las propagaciones de oleaje, las cuales han sido proyectadas en el plano geográfico, teniendo en cuenta las direcciones medias de propagación del oleaje para la segunda mitad del mes de agosto (de 220° a 300° con respecto al norte), la continuidad de cada tramo de costa y la resolución máxima de la malla, con base en los límites computacionales del modelo.

Cada una de las cuatro mallas numéricas fue diseñada con una resolución de $\Delta x = \Delta y = 50$ m, orientadas para la dirección principal del SW y con una profundidad de inicio de la propagación del oleaje alrededor de 40 m.

Las simulaciones fueron forzadas con la serie horaria de oleaje espectral en cada uno de los puntos de control (imagen 42), aportados por el modelo SWAN, teniendo en cuenta la variación del nivel del mar por marea astronómica, reconstruida con los datos resultantes del análisis armónico realizado con la serie instrumental del mareógrafo de Bonanza (36,80° N, 6,34° W), aportada por Puertos del Estado.

Se ha simulado un total de 332 estados de mar horarios (del 12 de agosto a las 17:00 al 26 de agosto a las 12:00) con el modelo MOPLA, a fin de evaluar la evolución del oleaje y las corrientes a lo largo de la línea de costa.

En el presente análisis no se realiza un trabajo de validación cuantitativa debido a la falta de mediciones instrumentales de los efectos del huracán Gordon en costa; sin embargo, se realiza una asimilación cualitativa de los resultados con base al presente informe, en donde se recoge un catálogo de fotografías aéreas oblicuas tomadas por Protección Civil durante los eventos de emergencia registrados en la playa de Conil de la Frontera.

4.4.1. Resultados de oleaje y corrientes.

Tras la simulación de los 332 estados de mar horarios en las cuatro mallas numéricas del modelo MOPLA, en este apartado se presentan los resultados del comportamiento del oleaje y corrientes en cada una de ellas.

La imagen 50 muestra los mapas de corrientes obtenidos para las cuatro mallas numéricas, comparando un instante previo y durante el paso del mar de fondo inducido por el paso del huracán Gordon para el 15 y 21 de agosto de 2012, respectivamente.

En la imagen 50 se puede observar la influencia en las corrientes asociadas a la rotura del mar de fondo inducidas por el paso del huracán Gordon frente a las costas de Cádiz.

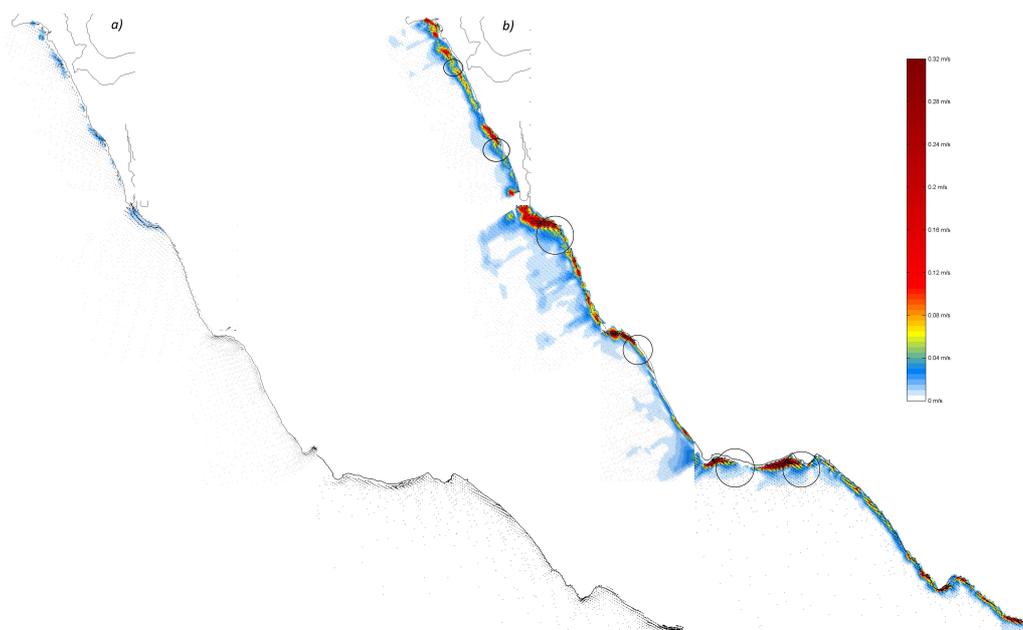


Imagen 50. Mapa de corrientes a lo largo de la costa de Cádiz para dos eventos temporales: a) antes (20 de agosto, 10:00) y b) después (21 de agosto, 10:00) de la llegada del mar de fondo inducido por el huracán Gordon.

Se observa que las corrientes antes de la llegada de dicho evento para el día 20 de agosto de 2012 no superan los 0,05 m/s, es decir, se pueden considerar despreciables para la seguridad del baño.

Por otro lado, cuando el mar de fondo con períodos $T_p \approx 15$ s alcanza las costas de Cádiz, se observa que las corrientes inducidas por la rotura del oleaje a lo largo de la costa sufren un aumento radical, alcanzando fácilmente corrientes longitudinales medias horarias de 0,5 m/s, e incluso llegando a presentar valores cercanos a 1,0 m/s en algunas zonas puntuales en la zona costera de Cádiz, así como la presencia de corrientes de retorno (*rip currents*,

indicados con círculos en la imagen 50, fomentados por el cambio de dirección del oleaje incidente comentado en la imagen 48. Estos valores coinciden con lo observado por Protección Civil (imagen 28) y con la seguridad de baño en la playa que se vio comprometida durante los días del evento del mar de fondo.

Este tipo de patrones en corrientes en playas se puede interpretar fácilmente como una «bandera roja» que restringe cualitativamente el baño en costa, debido a la presencia de oleaje de fondo con fuentes corrientes longitudinales y corrientes de retorno persistentes, según indican las recomendaciones aportadas por la guía operacional para la seguridad en playas europeas, publicado por la Royal Society for the Prevention of Accidents (RoSPA, 2005).

Finalmente, la imagen 51 muestra la evolución temporal y espacial de la altura de ola significativa en el punto de rotura, el módulo de velocidad de las corrientes y la dirección media de la corriente, para las simulaciones horarias (antes, durante y después del paso del huracán Gordon) realizadas con el modelo MOPLA.

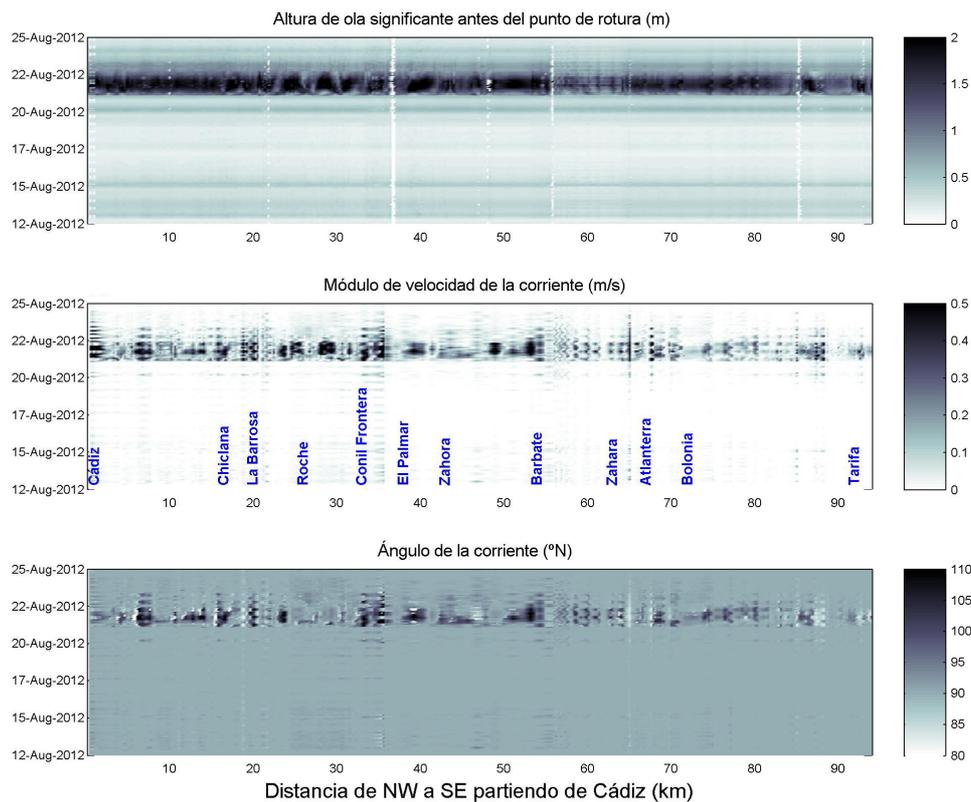


Imagen 51. Evolución espacio-temporal de la altura de ola significativa en el punto de rotura, el módulo de velocidad de las corrientes, y la dirección media de la corriente, a lo largo de la costa de Cádiz, para las fechas antes, durante y después del paso del huracán Gordon.

En el panel superior de la imagen 51 se puede observar, en primer lugar, el cambio que experimenta la altura de ola significativa tras la acción del mar de fondo creado por el huracán Gordon, donde se ve claramente una franja uniforme de oleaje alrededor a $H_s = 2$ m, que corresponde al punto de rotura de este en la costa.

En segundo lugar, se pueden observar conjuntamente los mapas del módulo de velocidad de la corriente en rotura y el mapa del ángulo medio de la corriente (paneles medio e inferior de la imagen 51), en donde se aprecia la evolución espacio temporal de la corriente de rotura generada por la acción del mar de fondo, mostrando paquetes bien definidos de corrientes por encima de $\bar{U} > 0,5$ m/s a lo largo de la costa de Cádiz, asociados a cambios bruscos del ángulo de rotura de 50° a 150° , lo cual se asocia a la presencia de corrientes de retorno de alta energía (la corriente longitudinal se interpreta con un ángulo de 80° a 90° en el gráfico).

4.5. Conclusiones del análisis numérico.

En este estudio se ha evaluado la generación, propagación e interacción con la costa del oleaje generado por el paso del huracán Gordon en la zona nororiental del Atlántico durante la segunda mitad del mes de agosto de 2012.

Se ha realizado un diagnóstico integral de la propagación de oleaje e interacción con la costa y zona de rompientes a través del acoplamiento de herramientas analíticas y numéricas, así como estrategias de fusión de bases de datos de diferentes escalas espacial y temporal.

Ha quedado demostrada la eficacia del uso de modelos paramétricos para una adecuada definición de los vientos de alta resolución asociados al huracán, así como su fusión con los campos de viento de media resolución (ERA-Interim).

Se ha observado que el modelo SWAN es una herramienta versátil y fiable para llevar a cabo estudios sobre generación y propagación de oleaje, asociado a eventos de huracán, a través de su implementación no estacionaria, el uso de mallas adaptativas e irregulares, la implementación de forzamientos complejos de viento de alta resolución, y la inclusión de contornos geográficos y batimétricos reales.

Se ha validado satisfactoriamente el oleaje numéricamente generado y propagado en diferentes estaciones de medidas (boyas) aportadas por Puertos del Estado.

Se han acoplado satisfactoriamente los resultados de oleaje generados por el modelo SWAN al modelo MOPLA para su propagación hacia la zona de rompientes y la obtención de la magnitud y dirección de los patrones de corrientes asociadas a la rotura del oleaje.

En resumen, la imagen 52 muestra un esquema general que describe la metodología de análisis propuesta en el presente estudio, teniendo en cuenta las diferentes fuentes de datos, forzamientos, acoplamiento entre modelos numéricos y flujo de trabajo general.

Este esquema puede ser localizado en cualquier zona geográfica que sea de especial interés por presencia o cercanía de eventos de huracán en costa.

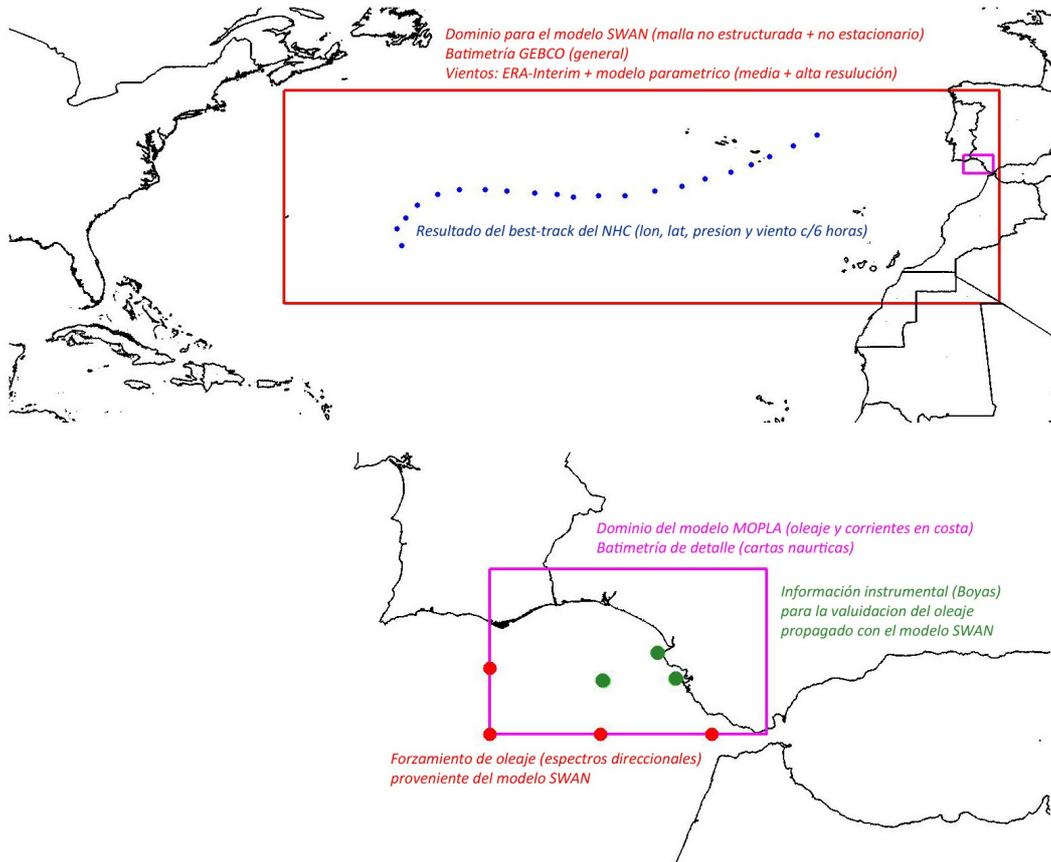


Imagen 52. Esquema general de la metodología propuesta en el presente estudio para el análisis de eventos de huracán, su generación propagación e impacto en costa.

5. Conclusiones.

El *Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Meteorología Adversa* o, también llamado, *Plan Meteoadvertencia*, incluye entre sus atribuciones la emisión de avisos especiales de tormenta tropical o huracán siempre que, en un plazo igual o inferior a 60 horas, el centro de la tormenta se encuentre a una distancia igual o inferior a 1.000 km de la zona potencialmente afectada. En este caso se emitirían además los avisos de viento, precipitación y fenómenos costeros¹² cuando alcancen los umbrales establecidos para ello. Puesto que Gordon perdió sus características tropicales a más de 1.000 km de las costas españolas más próximas, la AEMET no llegó a emitir estos avisos.

Sin embargo concluimos que durante los días 21 y 22 hubo un efecto real de resaca marina que afectó a una extensa área litoral de la Península Ibérica que discurre desde el distrito de Lisboa, en Portugal, hasta el Estrecho de Gibraltar. Aunque hay quienes consideraron que este fenómeno era un suceso normal atribuible a las mareas vivas, los autores de este informe calificamos el episodio de «extraordinario» en cuanto a la época del año en que se produjo y el fenómeno meteorológico —y caracterización del mismo— que lo generó. En todas las playas en las que fue visible este fenómeno coincidieron las fechas y las horas de acaecimiento, ya sea en Portugal, Huelva o Cádiz, y analizados los efectos y los datos que nos han permitido modelizar el fenómeno afirmamos sin margen de error que se trató de una marejada ciclónica coincidente en todo caso con una marea viva.

Lo que se observó efectivamente esos días fue la llegada de un mar de fondo o *swell* generado por el huracán Gordon, cuyos fuertes vientos además de su gran *fetch* (zona de acción de dichos vientos) provocaron oleajes de cierta altura y período, que dada la distancia a las costas españolas y portuguesas generaron lo que denominamos un oleaje bien desarrollado. Dicho oleaje, según las predicciones de Puertos del Estado posteriormente confirmadas por las mediciones, estuvo en torno a 1 m de altura con períodos de hasta 14 s entre ola y ola, generando un estado de la mar que interactuó con la costa fomentando la aparición de fuertes corrientes (por encima de 0,5 m/s) y corrientes de retorno. Estas características, si bien no son ni mucho menos excepcionales para el Golfo de Cádiz, sí que son relativamente «extrañas» para la época del año. Sin embargo, se han registrado en anteriores ocasiones en torno a esa época y principios de septiembre.

Al haberse producido este fenómeno durante la estación estival, época en la cual las playas de la zona tienden a presentar una mayor pendiente en la zona intermareal (líneas formadas por la pleamar y la bajamar absolutas), se ha favorecido otros dos fenómenos. El primero de ellos es el aumento del alcance de la ola o *run-up* a su llegada a la costa, nivel que depende de la pendiente de la playa y la altura de la ola. La pendiente de la playa actúa como una rampa de lanzamiento o tobogán, de modo que a mayor altura de ola y mayor pendiente,

¹² Los fenómenos costeros incluyen el viento en las zonas costeras, la altura del oleaje de la mar de viento y la altura del oleaje de la mar de fondo.

mayor alcance tendrá el *run-up*, que es precisamente lo que se produjo durante esos días. El segundo de los fenómenos fue un aumento de la reflexión del oleaje (retorno). Cuando mayor es la pendiente, mayor es la fuerza de reflexión, que al interactuar a su vez con otras olas incidentes de menor elevación favorece enormemente la creación de corrientes de resaca.

Teniendo en cuenta lo anterior, recomendamos a los servicios de emergencias de la costa atlántica española estar atentos desde su más incipiente gestación a la evolución de los ciclones tropicales del Atlántico —especialmente los que se forman o reorganizan en torno al paralelo 30° N— que pudieran enfilarse hacia la Península Ibérica. Para ello contamos con el sistema de alerta temprana del NHC, cuyos datos pueden visualizarse directamente en tiempo real a través de su portal web <http://www.nhc.noaa.gov> o a través también del *Global Disaster Alert and Coordination System* (GDACS). El GDACS es un marco de cooperación entre las Naciones Unidas, la Comisión Europea y los gestores de emergencias del mundo entero con el fin de mejorar las alertas, el intercambio de información y la coordinación durante la primera fase de los desastres mayores de impacto súbito. Ambos servicios son oficiales y gratuitos, y cualquier ciudadano o institución del mundo puede suscribirse a ellos mediante solicitud vía web y confirmación de correo electrónico, medio al que llegarán los avisos horarios, predicciones de evolución y efectos, y otras informaciones de gran interés para la seguridad y la protección civil.

Esta información debe combinarse con las predicciones y avisos especiales de ciclones tropicales de la AEMET y con los datos oceanográficos en tiempo real suministrados por la red de alerta de Puertos del Estado. Contando con estas fuentes y partiendo de nuestra experiencia actual, sería un buen ejercicio en futuros episodios mantener una vigilancia precoz (*watching*), analizando en tiempo real los siguientes parámetros:

- 1º) la distancia lineal recorrida por los ciclones tropicales desde que comienzan a girar hacia el este, hasta su punto de mayor aproximación a las costas españolas;
- 2º) su «directividad» en relación con su latitud, es decir, su trazado más o menos recto o curvo en relación con los paralelos¹³ y el rumbo;
- 3º) la intensidad del ciclón, en la que se tendrán en cuenta la velocidad de los vientos máximos sostenidos y su duración en el tiempo;
- 4º) la velocidad de desplazamiento del ciclón;
- 5º) la intensidad con la que llegan a la perpendicular de las Azores;
- 6º) la distancia de costa en la que pierden sus características tropicales;

¹³ El huracán Gordon tuvo una gran directividad, ya que deambuló 1.650 km en línea completamente recta sobre el paralelo 34° N y en dirección pura hacia el este.

- 7º) la coincidencia con una marea de *sicigia* o una marea meteorológica en áreas costeras; y
- 8º) las tablas horarias y coeficientes previstos de pleamar y bajamar.

A falta de sistemas de alerta temprana «ad hoc», a excepción de la ya mencionada red de mareógrafos de Puertos del Estado, la lectura de estos datos nos permitirá elaborar previsiones propias que nos permitirán adelantarnos a sus presumibles consecuencias mediante una vigilancia más activa. De este modo podremos realizar cálculos simples y aproximados sobre el tiempo de llegada del primer impacto, la duración en días y su intensidad por fracciones de día.

Si durante el período de vigilancia, los servicios de emergencia —aun a nivel local— observaran o tuvieran conocimiento de la aproximación de tormentas ciclónicas procedentes del Atlántico en condiciones favorables para la formación de marejadas ciclónicas que pudieran alcanzar las costas españolas, máxime si la red de mareógrafos lo advirtiera, los responsables de Protección Civil deberían pasar a la situación de alerta (*warning*), al menos en el nivel de preemergencia. Recomendamos la disposición y activación de un plan específico de emergencia en playas, similar al Plan COPLA (Murcia) o al Plan SAPLA (Asturias), adecuadamente incardinado en el modelo de planificación dispuesto por la Norma Básica de Protección Civil (R.D. 407/1992), para hacer frente a este y a otros riesgos de impacto costero. Esta experiencia ha demostrado que se debe actuar y responder de una manera ensayada y coordinada, activándose con la suficiente antelación el nivel de preemergencia (impacto previsible) con izada de banderas amarillas, y con izada de bandera roja en caso de pasarse al nivel de emergencia (impacto inmediato), ya sea en situación 0 (suceso inminente) o en situación 1 (emergencia local). Nuestras simulaciones y datos históricos hacen poco probable el tránsito a la situación 2 (emergencia supralocal) y muy poco o nada probable el tránsito a la situación 3 (emergencia de interés nacional). En caso de no disponer de un plan específico de emergencia en playas, las autoridades deberían decretar en su defecto la activación del Plan de Emergencia Municipal (PEM), que es el plan de emergencia marco del que se dispone a nivel local para atender cualquier tipo de riesgo catastrófico o potencialmente catastrófico que no goce de una planificación especial o específica.

Entre las decisiones a adoptar en caso de impacto de corrientes de resaca o *rip currents*, están las siguientes:

- a) activación del plan de emergencia;
- b) contacto e intercambio de información con Puertos del Estado, Demarcación de Costas, Autoridades Portuarias y otros entes y organismos estatales y autonómicos con competencias o demarcación marítimo-costeras;

- c) supresión y prohibición del baño;
- d) difusión de recomendaciones e información a los usuarios de playas;
- e) rescate de bañistas;
- f) vigilancia de la franja costera;
- g) observación y señalización de cuellos de resaca;
- h) lanzamiento de boyas en las zonas reservadas al baño para calcular la deriva de las corrientes marinas;
- i) marcar y reportar los niveles máximos de *run-ups*;
- j) valoración de los daños materiales en bienes e infraestructuras, y la erosión medioambiental ocasionada por la marejada;
- k) coordinación de actuaciones e intercambio de información con municipios costeros limítrofes;
- l) etc.

Para terminar, es importante reiterar, sin que esto pueda ser calificado de alarmismo, que existe la posibilidad real de que un evento de estas características se llegue a repetir en las costas españolas, por lo que es deseable que las autoridades planteen en un futuro un sistema operacional de alerta temprana de fenómenos costeros, que logre predecir los efectos de este tipo de mar de fondo, su duración, magnitud y efectos en costa, a fin de poder establecer los planes de seguridad, aviso a la población y contingencia.

Anejo 1.

La presión P_r (ecuación A.1) en mb y el viento W (ecuación A.2) por encima de 10 m sobre el nivel medio del mar (en km/h), se describen como sigue:

Ecuación A.1

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0) \cdot e^{\left(\frac{R}{r}\right)}$$

Ecuación A.2

$$W = 0.886(F_V \cdot U_R + 0.5 \cdot V_F \cos(\theta + \beta))$$

donde,

$$U_R = 21.8 \cdot \sqrt{P_N - P_0} - 0.5 \cdot f \cdot R$$

$$F_V = 1 - 0.971 \cdot \exp\left(-6.826 \left(\frac{r}{R}\right)^{4.798}\right) \text{ para } \frac{r}{R} < 1$$

$$F_V = \exp\left(A \cdot \ln^3\left(\frac{r}{R}\right) \cdot \exp\left(B \cdot \ln\left(\frac{r}{R}\right)\right)\right) \text{ para } \frac{r}{R} \geq 1$$

$$A = -0.99 \cdot \left(1.066 - \exp\left(-1.936 \cdot \left(\frac{f \cdot R}{U_R}\right)\right)\right)$$

$$B = -0.357 \cdot \left(1.4456 - \exp\left(-5.2388 \cdot \left(\frac{f \cdot R}{U_R}\right)\right)\right)$$

P_0 es la presión central del huracán (mb); P_r es la presión a cualquier distancia radial (km); P_N es la presión atmosférica inalterada (comúnmente asumido 1.013 mb); R es el radio del viento ciclostrofico (km); f es el parámetro de Coriolis $f = 2\omega \sin(\varphi)$; ω es la velocidad angular de la Tierra ($\omega = 0,2618 \text{ rad/h}$); φ es la latitud; r es la distancia radial medida desde el centro de la perturbación atmosférica; $\theta + \beta$ es el ángulo entre la velocidad de la traducción total del huracán V_F (km/h) y el viento, la velocidad a una distancia radial U_R (km/h); F_V es un factor de amortiguamiento que se calcula a través de las siguientes relaciones:

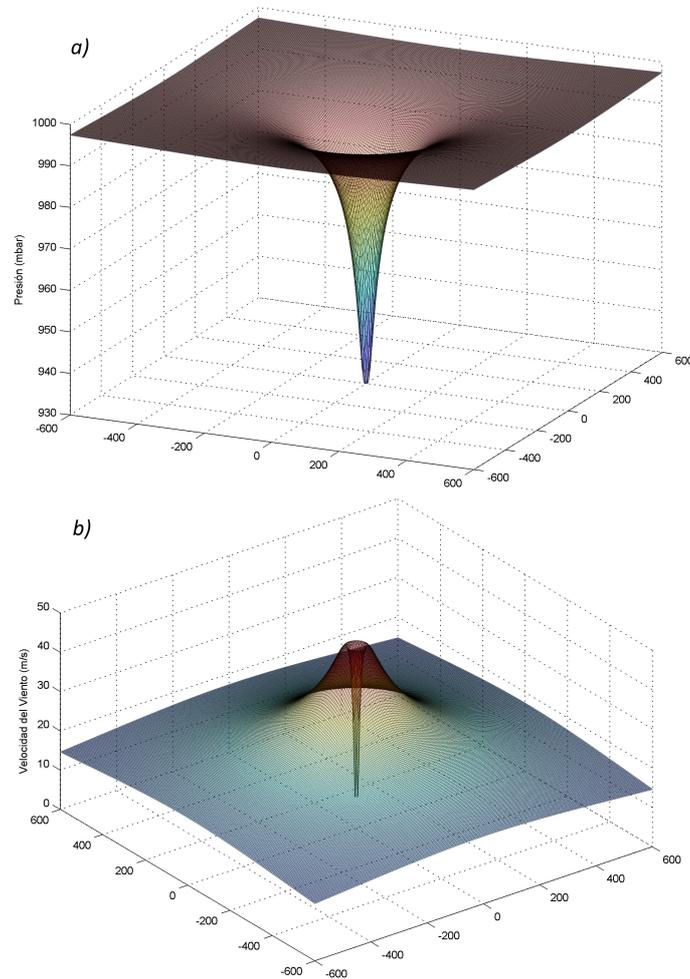


Imagen 53. Ejemplo de la distribución 3D de la a) presión y el b) campo de viento obtenido con el modelo Hydromet-Rankin Vortex.

La imagen 53 muestra la distribución tridimensional de la presión y viento, tras la aplicación de las ecuaciones 1 y 2 mostradas anteriormente, para los parámetros de huracanes $R = 31.95$ km, y $P_0 = 930$ mb sobre un dominio de 1200×1200 km.

Con el fin de obtener los mapas espacio temporales de presión y viento, es necesario conocer: la presión central, la posición geográfica del centro del huracán y su evolución temporal, y la evolución de la radio ciclostrofico calculado por la relación propuesta por (Silva et al., 2002). Esta información se recoge del informe del NHC (2012).

Agradecimientos

IAEM-España, los autores y cuantos han participado en la producción del presente trabajo queremos agradecer la colaboración, apoyo e interés que nos han dedicado todas las instituciones, Administraciones públicas, servicios operativos, profesionales de otros servicios, colaboradores y ciudadanos que han hecho posible esta investigación y su finalidad práctica.

Licencias de uso

IAEM-España autoriza el uso y distribución de los contenidos de la presente edición (a excepción de las imágenes mostradas), citando siempre la fuente bibliográfica.

Cualquier extracto o referencia que se realice de la obra deberá ser literal, no alterando en ningún caso el texto original y dentro de un contexto adecuado que evite la interpretación errónea del párrafo o párrafos extractados o mencionados. En este caso, las referencias bibliográficas que se deberán citar de forma íntegra son las siguientes:

Obra completa:

APARICIO FLORIDO, J.A. (Coord.) et al. *Informe sobre la resaca marina del 21 de agosto de 2012 en las costas de Cádiz*. Cádiz: IAEM-España, 2013, 82 págs.

Capítulo 2:

APARICIO FLORIDO, J.A.; BENAVENTE GONZÁLEZ, J.; y CALVO HURTADO, J.M. «El huracán Gordon: generación, evolución y efectos». En: *Informe sobre la resaca marina del 21 de agosto de 2012 en las costas de Cádiz*. Cádiz: IAEM-España, 2013, págs.

Capítulo 3:

ÁLVAREZ FANJUL, E.; PÉREZ GÓMEZ, B.; GÓMEZ LAHOZ, M.^a; DE ALFONSO ALONSO MUÑOYERRO, M.; y RUIZ GIL DE LA SERNA, M.^a «Análisis de los efectos y daños observados». En: *Informe sobre la resaca marina del 21 de agosto de 2012 en las costas de Cádiz*. Cádiz: IAEM-España, 2013, págs.

Capítulo 4:

MÉNDEZ INCERA, F.J. y DÍAZ HERNÁNDEZ, G. «Análisis numérico del huracán Gordon y diagnóstico de sus efectos hidrodinámicos en las costas de Cádiz». En: *Informe sobre la resaca marina del 21 de agosto de 2012 en las costas de Cádiz*. Cádiz: IAEM-España, 2013, págs.

Todas las imágenes mostradas en este documento son de uso libre, pero son propiedad de sus respectivos autores, cuya identidad se cita al pie de las mismas. Por tanto, remitimos a las fuentes originales para su descarga, uso, reelaboración y distribución, respetando sus legítimas licencias de uso.

Aunque se permite el uso y distribución libre de los contenidos de esta edición, conviene decir que los mismos están protegidos por derechos de autor, por lo que bajo ningún concepto podrán ser objeto de comercialización o acto lucrativo de cualquier tipo sin expresa autorización de sus respectivos autores o de IAEM-España.