

Capa de Aerosol Sahariana en el Caribe Nororiental precede la generación de los meteotsunamis en Puerto Rico

Por

Edwin Alfonso-Sosa, Ph. D.

Ocean Physics Education

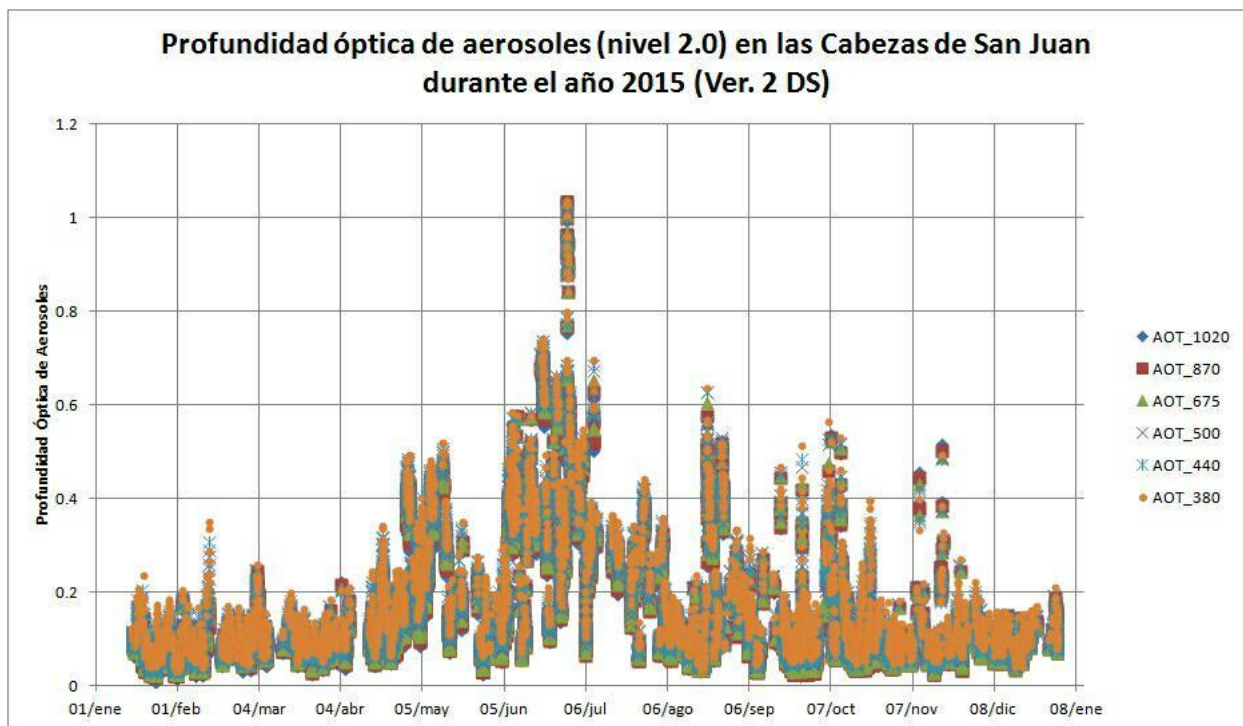
Primer manuscrito 1-junio-2017, revisado 6-junio-2017.

En el Caribe Oriental los meses de verano (junio, julio y agosto) se destacan por la llegada de una capa de aire sahariana cargada de aerosoles que provienen de la costa oeste del Norte de África. Imágenes del sensor satelital MODIS captan con facilidad la travesía de la capa de aerosoles desde que sale de la costa africana y cruza el Atlántico Tropical hasta Puerto Rico en tan sólo unos 5 días. La capa de aerosoles contiene polvo que absorbe y difunde la luz solar incidente provocando un aumento en la profundidad óptica de aerosoles. Esta última se registra en la estación de [AERONET](#) localizada en el Cabezas de San Juan, Puerto Rico, por la cual es responsable el investigador principal, Olga L. Mayol-Bracero (UPR). Seleccionamos los datos nivel 2.0, que han pasado por todos los controles de calidad y son los más confiables. Seleccionamos aquellos días de los años 2012, 2015 y 2016 que anteceden los eventos de meteotsunami en el Puerto de Fajardo. La serie de tiempo más completa - entre esos tres años- fue la correspondiente al año 2015. La Figura 1 muestra la trayectoria anual (2015) de la profundidad óptica de aerosoles, en donde valores iguales o superiores a 0.4 son observados con mayor frecuencia desde el mes de mayo hasta agosto. Un valor menor de 0.1 representa un cielo azul despejado de polvo, en cambio un valor de 1.0 representa un cielo oscurecido severamente por la gran cantidad de polvo. Valores iguales o superiores a 0.4 nos sirven como indicadores de la presencia de la capa de aerosol sahariana en Puerto Rico. La Figura 1 muestra que en junio se alcanzaron valores superiores a 0.8. Sobre el margen oriental del Océano Atlántico Tropical la capa se extiende desde una altura de 1.5 km hasta los 5.5 km, pero cuando esta capa llega al Caribe Oriental se reduce su altura y espesor, partiendo desde 1 km y terminando a los 4.5 km (Weinzierl et al., 2016). Por debajo de eso, existe una capa de aire marino la cuál es más húmeda, pero se va cargando del polvo y se reduce la precipitación en Puerto Rico. La capa de aire sahariana cargada de aerosoles se caracteriza por ser cálida, seca y con una fuerte cizalladura vertical del viento, ejerciendo un efecto estabilizador. Durante los eventos de capa de aire sahariano, las ondas tropicales que se desarrollan en el Caribe Oriental se caracterizan por una fuerte cizalladura vertical del viento, debido a la intensidad anómala del chorro africano del Este en las capas medias y bajas de la troposfera (rapidez > 20 m/s) (Laing and Evans, 2016). Además se caracterizan por humedad relativa más baja de lo normal y por mayor estabilidad atmosférica. Estas condiciones pudieran ser favorables para la generación de meteotsunamis, tal como se encontró sobre el Mar Mediterráneo. Allí investigadores (Šepić, J. et al, 2015) han identificado tres condiciones atmosféricas necesarias para iniciar un meteotsunami: un influjo de aire cálido y seco desde

África en alturas de ~ 1.5 km (~ 850 hPa) que mantiene una capa estable hasta una altura de 4 km; una corriente de chorro del SO con una rapidez superior a los 20 m/s ocurriendo a una altura ~ 5000 m (~ 500 hPa); una capa inestable con números $Ri < 0.25$ en una altura entre 4000 y 6000 m (600-400 hPa). No sólo en la cuenca mediterránea se ha observado condiciones de aerosoles africanos previo a un evento de meteotsunami. En el sur de Inglaterra el 27 de junio del 2011 entre las 02:00 UTC y 10:00 UTC se registró por medio de LIDAR una capa de aerosoles africana a una altura de alrededor de 4 km sobre el suelo (Sibley 2013). Entre las 08:00 UTC y las 10:00 UTC la capa fue impactada por turbulencia. El meteotsunami golpeó la costa de Plymouth a las 08:00 UTC (Tappin et al., 2013).

En este reporte proponemos que en el Mar Caribe Nororiental los eventos de capa de aire sahariana con aerosoles crean una capa estable que precede el inicio de los meteotsunamis durante la llegada de ondas tropicales a Puerto Rico.

Figura 1. Trayectoria anual (año 2015) de la profundidad óptica de aerosoles en el Cabezas de San Juan.



Los datos nivel 2.0 son cortesía de Olga L. Mayol-Bracero (UPR) y del proyecto [AERONET](#) de NASA/GSFC.

Las tres etapas del meteotsunami que afecta el Puerto de Fajardo (Alfonso-Sosa, 2014e) son las siguientes (Figura 2):

1. En el mes de agosto, una onda tropical fuerte se mueve hacia el Oeste desde África hacia Puerto Rico con una rapidez promedio de 25 MPH. La onda tropical genera un extenso campo de vientos (15-25 nudos), con algunas áreas concentradas de vientos más fuertes (25-30 nudos). A la onda le antecede una región de aire bastante seco y estable. Ocurre una transición bastante rápida (pocas horas) en las condiciones atmosféricas.

2. Acompaña a la onda tropical fuerte un pulso en la presión atmosférica. El pulso puede alcanzar una magnitud entre 0.4 mb hasta 1.6 mb. El pulso de presión atmosférica se desplaza con una rapidez, U , igual a 35 MPH. El aumento en presión deprime el nivel de la superficie del mar unos -0.4 cm hasta -1.3 cm, debido al efecto de barómetro invertido estático. Esta perturbación de la superficie del mar tiene el efecto de generar una ola de gravedad con longitud de onda larga.

3. Cuando el pulso de presión cruza el veril de la plataforma insular y se encuentra en aguas de poca profundidad ($H = 25$ m), la celeridad de la ola larga, C , y la del pulso atmosférico, U , se aproximan a ($U \approx C = 35$ MPH). Esto permiten que el pulso y la ola se acoplen durante el viaje de 50.8 km, que es la distancia que separa al Puerto de Fajardo, del veril de la plataforma localizado al ESE (115° T) del mismo. Esta distancia se recorre aproximadamente en no menos de 30 minutos.

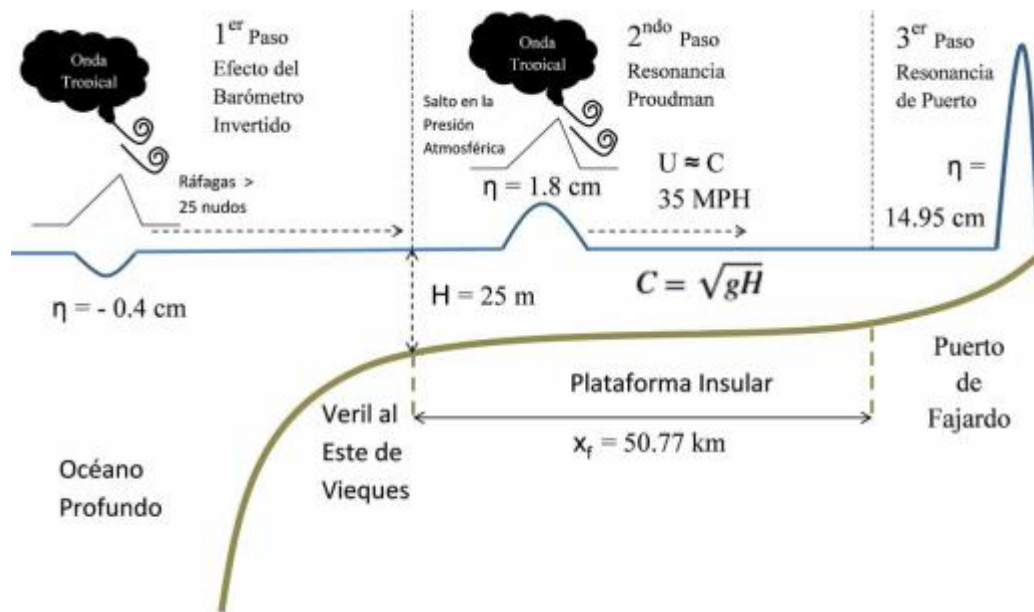


Figura 2. Etapas de un meteotsunami en el Puerto de Fajardo.

La Figura 3 muestra el registro del nivel del agua luego de haber removido la señal de la marea correspondiente al día 8 agosto del 2014 (Alfonso-Sosa, 2014d). Se destaca el súbito incremento en la amplitud durante el golpe del meteotsunami a las 16:53 GMT. La Tabla 1 muestra un listado de los meteotsunamis ocurridos en el Puerto de Fajardo antes del 20 de junio del 2016. La mayoría de los eventos ocurren en el mes de agosto, seguido por el mes de junio. En el mes de agosto hay presencia de la capa de aerosol sahariana y las ondas tropicales que llegan a Puerto Rico son más fuertes, estas son dos condiciones que favorecen el inicio de un meteotsunami.

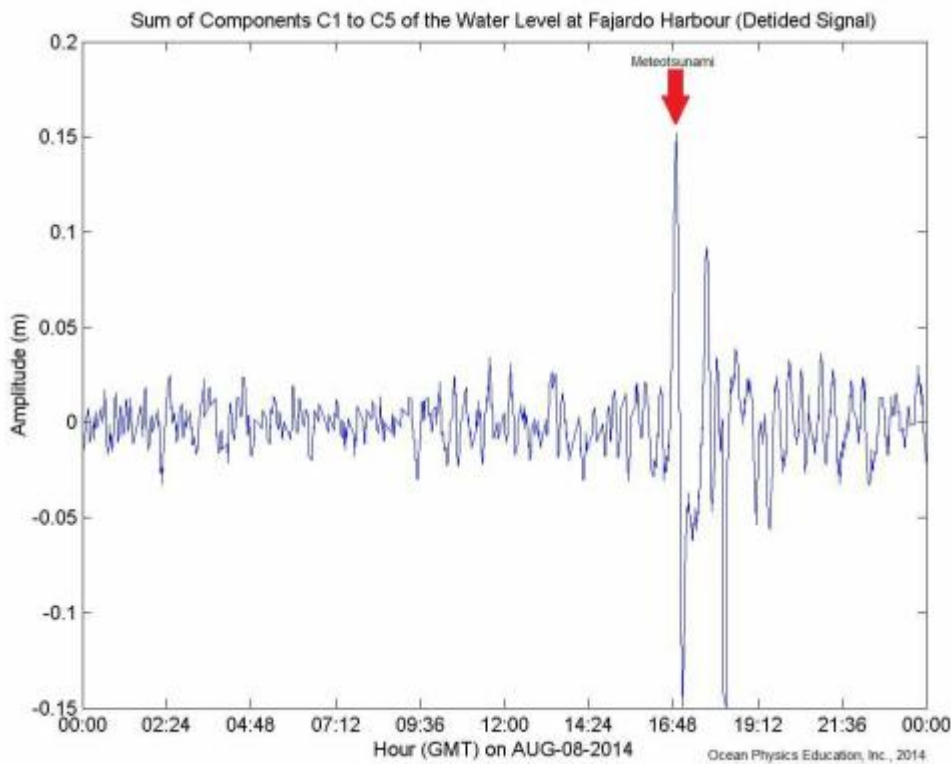


Figura 3. Amplitud de la suma de los componentes C1 a C5 (IMFs) en el Puerto de Fajardo.

Meteotsunami Events at Fajardo Harbor, Puerto Rico (Years 2011-2016) compiled by Edwin Alfonso-Sosa (2016).

Location	Date (GMT)	Atm. pressure Jump at the sea surface Δp (mb, hPa)*	Speed of Atmospheric Disturbance U (MPH)	Maximum elevation of the water level $\Delta \eta$ (m)	Amplification factor $ \Delta \eta / \Delta \eta^* $	Long Wave Celerity C (MPH)	Amplitude in the harbor (m)	Harbor Amplification Factor (m)
Fajardo, PR	8/16/11 18:30	1.3	38.64	1.75E-02	1.4	35.0	0.0934	5.3
Fajardo, PR	8/17/11 2:42	0.6	32.20	1.46E-02	2.4	35.0	0.1261	8.7
Fajardo, PR	8/4/12 0:18	0.9	38.64	1.82E-02	2.0	35.0	0.1753	9.6
Fajardo, PR	8/4/12 4:24	0.6	38.64	2.43E-02	4.1	35.0	0.1204	5.0
Fajardo, PR	8/13/12 3:18	1.6	21.47	3.88E-02	2.4	35.0	0.1943	5.0
Fajardo, PR	8/8/14 16:53	0.4	34.86	1.79E-02	4.5	35.0	0.1495	8.3
Fajardo, PR	8/22/14 15:30	1.1	38.64	4.45E-02	4.1	35.0	0.0789	1.8
Fajardo, PR	8/22/14 17:47	0.6	38.64	1.21E-02	2.0	35.0	0.0696	5.7
Fajardo, PR	6/22/15 17:41	0.9	48.30	9.70E-03	1.1	35.0	0.1076	11.1
Fajardo, PR	6/20/16 3:48	0.6	62.00	9.07E-03	1.5	35.0	0.1250	13.8
		*Esperanza, Vieques						

Tabla 1. Meteotsunamis registrados en el Puerto de Fajardo hasta el 20 de junio del 2016.

Las Figuras 4A, 4B y 4D muestran una capa de aerosol sahariana – con valores de AOT mayores de 0.4 – que pasa por Puerto Rico y las Antillas Menores el 2 de agosto del 2013. La presencia de la capa estable permite que se generen olas de gravedad atmosféricas en el lado de sotavento de las islas del Caribe (vea Figuras 4C, 5A y 5C). Las imágenes de MODIS captan con claridad las olas que se extienden hasta 200 km al oeste de las islas. La presencia de la capa estable fomenta la propagación de las olas. Esto hace posible la detección de las olas en el registro de presión atmosférica en St. Croix (Figura 6). Este caso ejemplifica que la capa de aerosoles sahariana favorece las olas de gravedad atmosféricas.

Similarmente, olas de gravedad atmosféricas generadas por una onda tropical pudieran sustentarse en una capa de aire estable que precede a la onda. Las Figura 8B muestran valores de profundidad óptica superiores ($AOT > 4$) antes de llegar la onda tropical, pero cuando la onda golpea el Este de Puerto Rico los valores de profundidad óptica son inferiores ($AOT < 3$), (Figuras 7B, 9B y 10B). Es obvio que la onda tropical trae consigo una masa de aire húmeda con una merma de polvo sahariano, que va a reducir las mediciones de aerosoles sobre Puerto Rico. El meteotsunami de mayor amplitud (vea Tabla 1) en el Puerto de Fajardo ocurrió el 13 de agosto del 2012 03:18 cuando le precedió una capa sahariana con una mayor profundidad óptica de aerosoles ($AOT > 4$). Por último, las Figuras 11-14 muestra un meteotsunami de menor amplitud que ocurrió el 31 de julio del 2016 y los correspondientes espectros de energía.

Los datos de profundidad óptica de aerosol apuntan a que una capa estable – por presencia del aerosol sahariano – precede la ocurrencia de los meteotsunamis; y que esta capa facilita la transmisión de olas de gravedad atmosféricas. La reducción de la capa de aerosol sahariana, durante los meses de septiembre, octubre y noviembre, correspondientes al periodo 2012-2016, pudiera ser un factor desfavorable a los eventos de meteotsunamis. No se detectaron meteotsunamis durante ese periodo.

Reconocimiento

Se reconoce que este reporte no hubiera sido posible sin los datos registrados por AERONET (NASA/GSFC) y disponibles en su portal de internet en https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/index.html

Reconocemos la labor del investigador principal, Olga L. Mayol-Bracero (UPR). Su trabajo ha hecho posible que esta valiosa y extensa serie de tiempo haya sido registrada y preservada para futuras investigaciones.

Referencias

- Alfonso-Sosa, Edwin, (2014d). Reporte final del meteotsunami ocurrido en el Puerto de Fajardo el 8 de agosto del 2014. Ocean Physics Education, 15 pp. [http://www.academia.edu/7985135/Reporte final del meteotsunami ocurrido en el Puerto de Fajardo el 8 de agosto del 2014](http://www.academia.edu/7985135/Reporte_final_del_meteotsunami_ocurrido_en_el_Puerto_de_Fajardo_el_8_de_agosto_del_2014)
- Alfonso-Sosa, Edwin, (2014e). Meteotsunamis en el Puerto de Fajardo. Ocean Physics Education, 10 pp. [http://www.academia.edu/8058659/Meteotsunamis en el Puerto de Fajardo](http://www.academia.edu/8058659/Meteotsunamis_en_el_Puerto_de_Fajardo)
- Laing A. and Jenni-Louise Evans, (2016-03). Introducción a la meteorología tropical. 2da edición. Cap. 7. The Comet® Program. http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/index.htm

Šepić, J., I. Vilibić, A. B. Rabinovich and S. Monserrat. Widespread tsunami-like waves of 23-27 June in the Mediterranean and Black Seas generated by high-altitude atmospheric forcing. *Sci. Rep.* 5, 11682; doi: 10.1038/srep11682 (2015).

Sibley, A., (2013). Saharan dust and convective downdraughts on 27 June 2011 monitored by LIDAR and wind profilers. *Weather*, June 2013, Vol. 68, No. 6.

Tappin, David R., et al., (2013). "The English Channel 'tsunami' of 27 June 2011—a probable meteorological source." *Weather* 68.6 (2013): 144-152.

Weinzierl, B., A. Ansmann, J. Prospero, D. Althausen, N. Benker, F. Chouza, M. Dollner, D. Farrell, W. Fomba, V. Freudenthaler, J. Gasteiger, S. Groß, M. Haarig, B. Heinold, K. Kandler, T. Kristensen, O. Mayol-Bracero, T. Müller, O. Reitebuch, D. Sauer, A. Schäfler, K. Schepanski, A. Spanu, I. Tegen, C. Toledano, and A. Walser, (2016): The Saharan Aerosol Long-range Transport and Aerosol-Cloud-Interaction Experiment (SALTRACE): overview and selected highlights. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* doi:10.1175/BAMS-D-15-00142.1

2 agosto 2013

Figura 4A



Profundidad óptica de aerosoles (nivel 2.0) en las Cabezas de San Juan durante el 2 agosto 2013 (Ver. 2 DS)

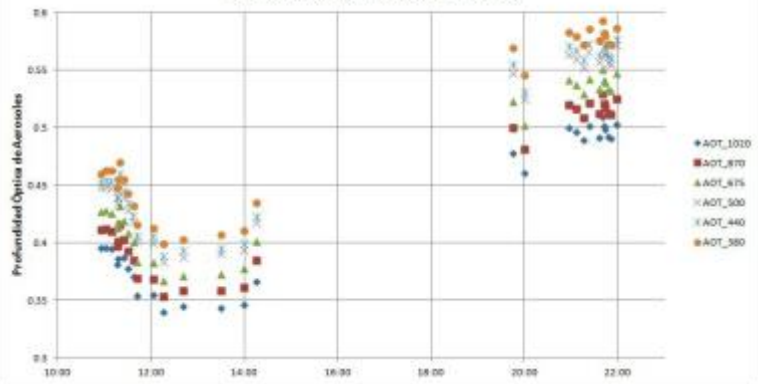


Figura 4B

3 agosto 2013

Figura 4C



Profundidad óptica de aerosoles (nivel 2.0) en las Cabezas de San Juan durante el 3 agosto 2013 (Ver. 2 DS)

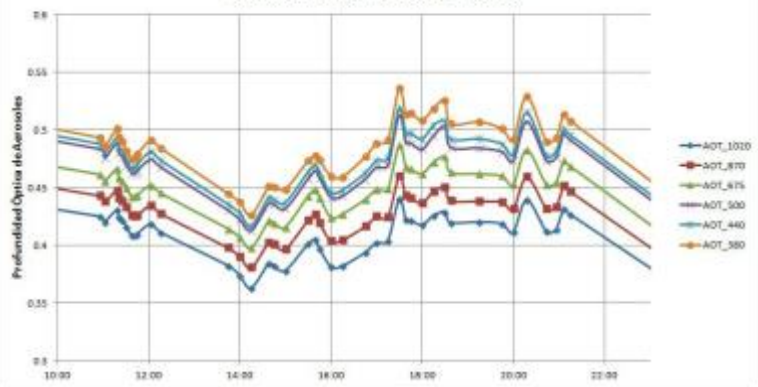


Figura 4D

La Figura 4A es una imagen del Caribe Oriental captada el 2 de agosto del 2013 por MODIS. La curva de contorno color naranja contiene el área con mayor concentración de polvo sahariano. La Figura 4B muestra la profundidad óptica de aerosoles (nivel 2.0) medida el 2 de agosto del 2013. La Figura 4C muestra el Caribe Oriental el día 3 de agosto del 2013. La Figura 4D muestra profundidad óptica de aerosoles medida en las Cabezas de San Juan el 3 de agosto del 2013.

3 agosto 2013

Fig. 5A



Le Raizet Air TEMP C (3 AUG 2013)

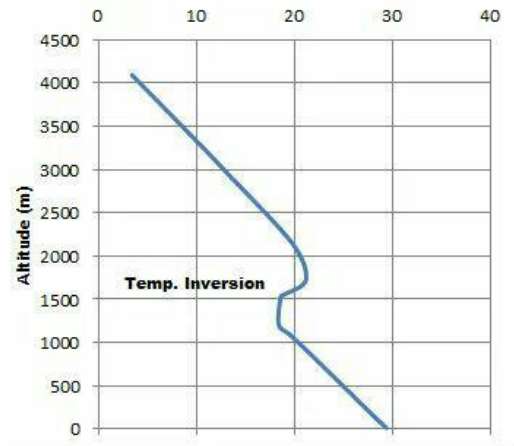


Figura 5B



Figura 5C

Figura 5A Imagen de Guadeloupe captada por MODIS el día 3 de agosto del 2013. Figura 5B, Perfil de temperatura registrado por una sonda meteorológica en el aeropuerto de Le Raizet. Figura 5C, Imagen del Caribe Nororiental captada por MODIS el 3 de agosto del 2013.

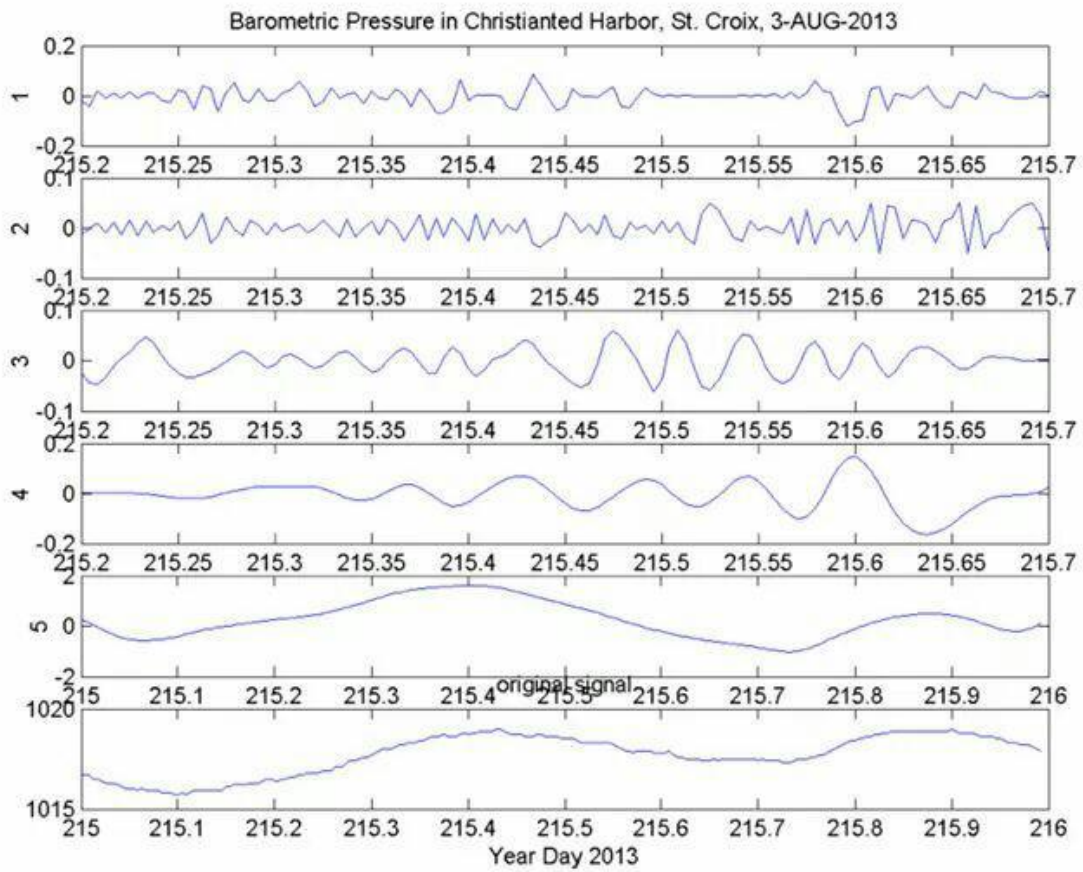
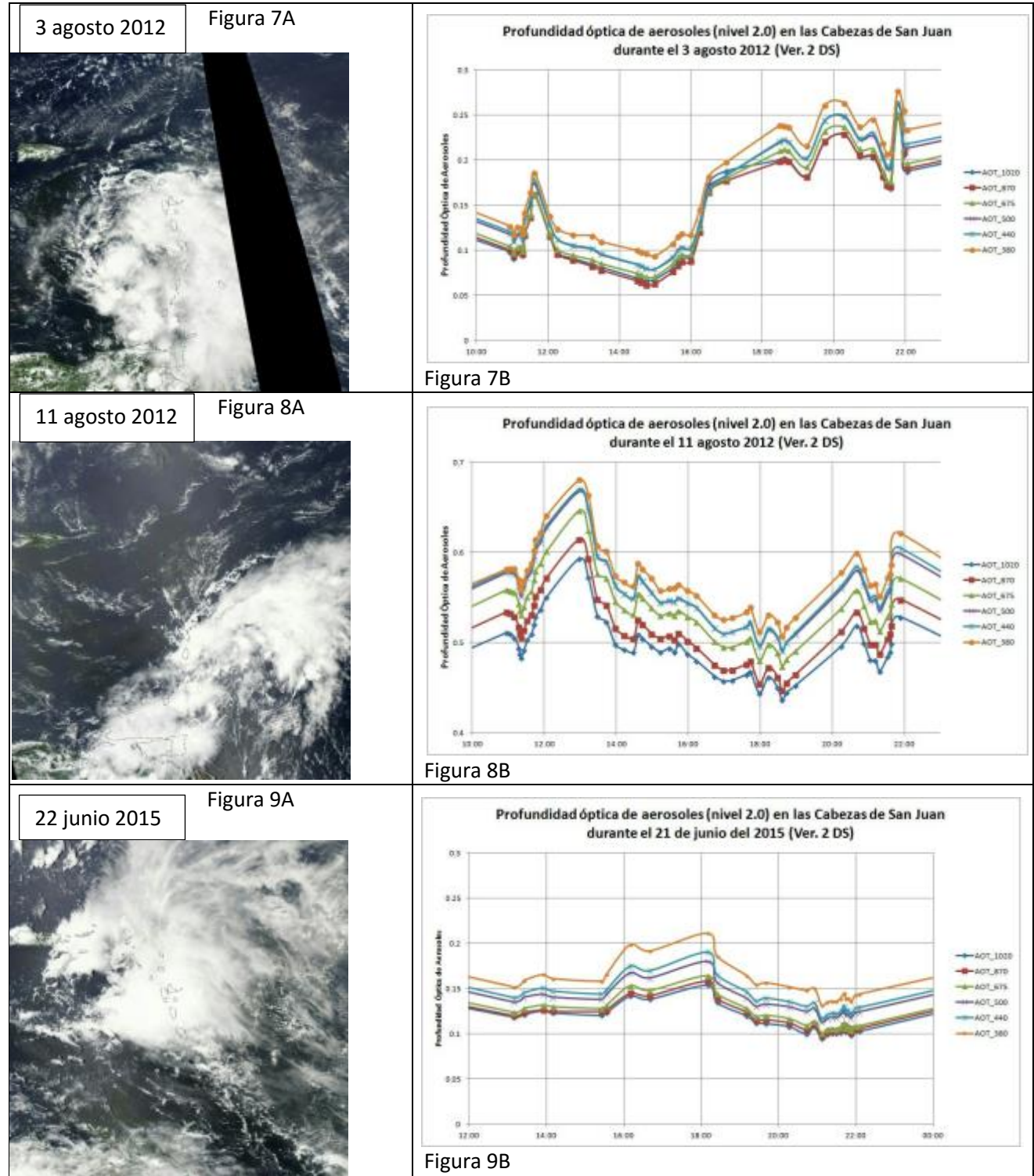


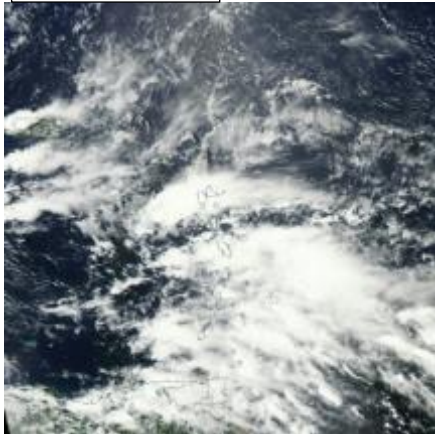
Figura 6. Las cinco IMFs que se obtuvieron luego del análisis EMD de la presión atmosférica medida en Christianted Harbor. El panel 4 muestra la IMF correspondiente a las olas de gravedad atmosféricas. En el panel inferior se muestra la señal original antes de ser analizada.

Figuras 7-10. En el panel izquierdo se muestra la imagen del Caribe Oriental captada por MODIS antes de la llegada de la onda tropical que genera el meteotsunami. En el panel derecho se muestra la correspondiente profundidad óptica de aerosoles medida en Cabezas de San Juan, Puerto Rico. Los datos nivel 2.0 son cortesía de Olga L. Mayol-Bracero (UPR) y del proyecto [AERONET](#) de NASA/GSFC.



19 junio 2016

Figura 10A



Profundidad óptica de aerosoles (nivel 2.0) en las Cabezas de San Juan durante el 18 junio 2016 (Ver. 2 DS)

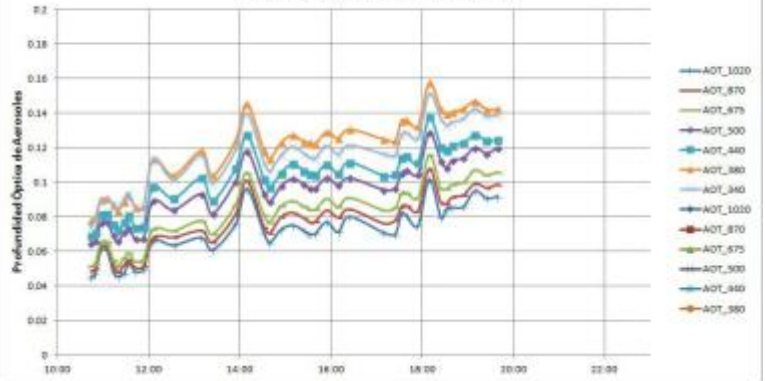


Figura 10B

31 julio 2016

Figura 11



Meteotsunami in Puerto de Fajardo on July-31-2016

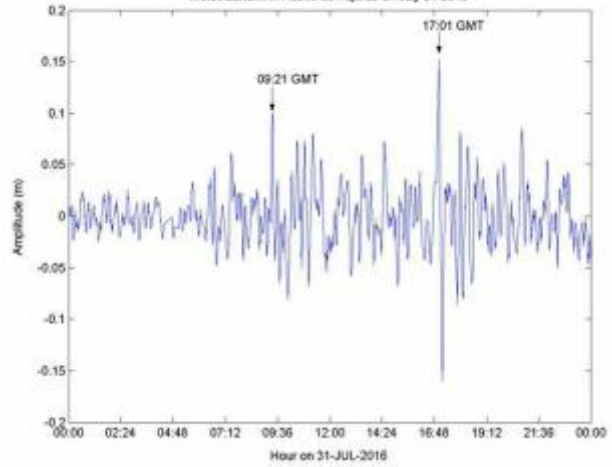


Figura 12

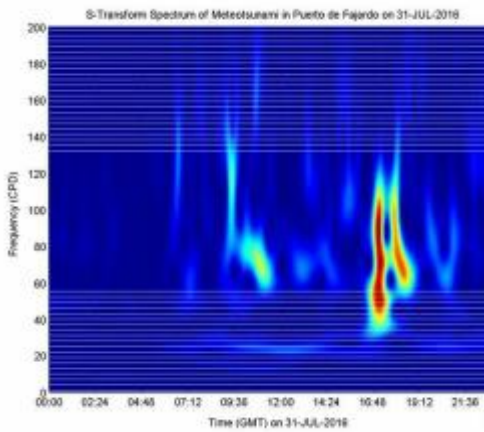


Figura 13

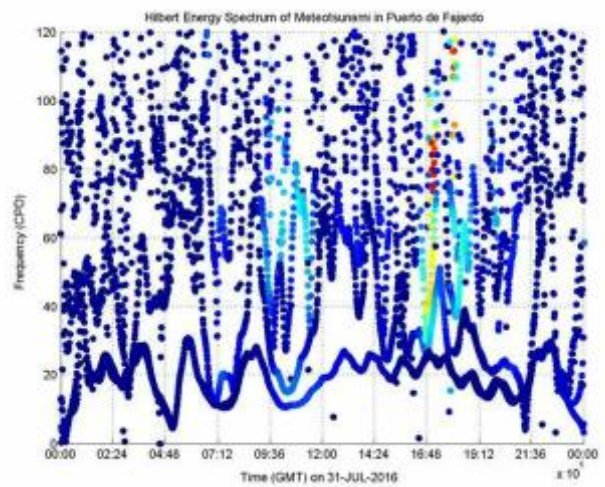


Figura 14

Figura 11 muestra imagen del Caribe Oriental captada por MODIS durante el impacto del meteotsunami del 31 julio del 2016. La Figura 12 muestra la amplitud de las oscilaciones en el Puerto de Fajardo el 31 de julio del 2016. Se distingue el meteotsunami a las 17:01 GMT (13:01 LST). Figura 13 muestra el espectro de energía de la Transformada-S del registro de las oscilaciones en el Puerto de Fajardo. Color rojo oscuro representa la mayor energía. La Figura 14 muestra el espectro Hilbert de energía de las mismas oscilaciones registradas el 31 de julio del 2016. Color rojo representa la mayor energía.