

Reporte final del meteotsunami ocurrido en el Puerto de Fajardo el 8 de agosto del 2014

Por

Edwin Alfonso-Sosa, Ph. D.

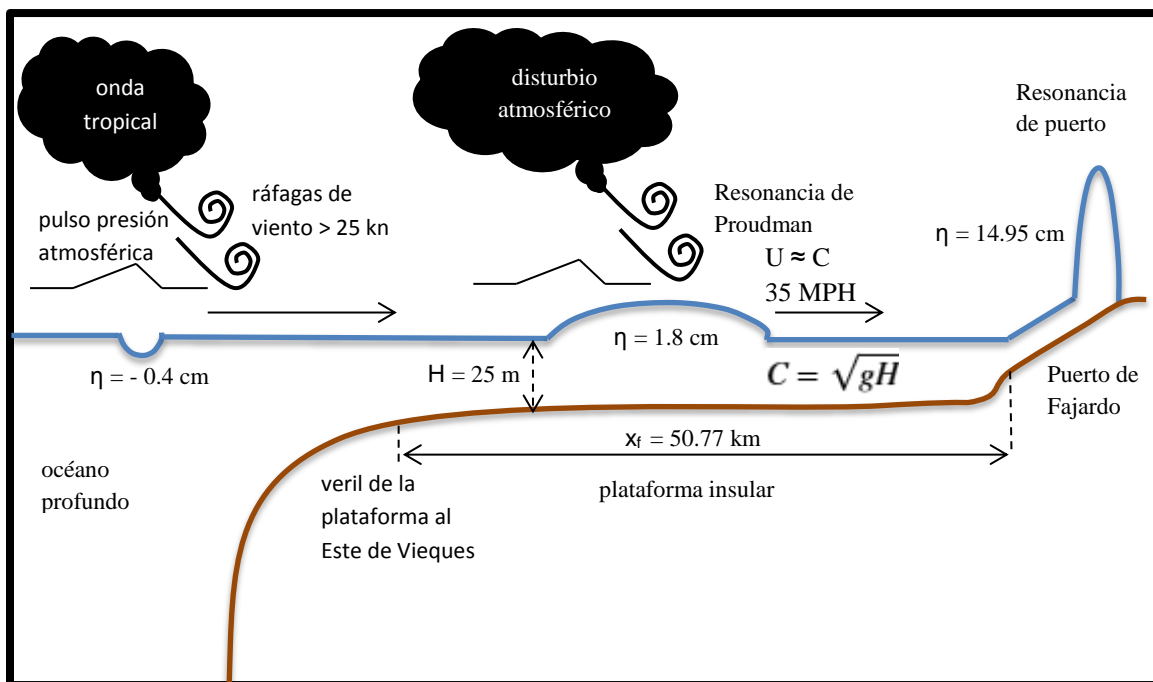
Ocean Physics Education, Inc.

14-ago-2014

Resumen

El 8 de Agosto del 2014 a las 12:53 LST (Hora Local) ocurrió un meteotsunami con una altura de 29.9 cm (0.98 ft) en el Puerto de Fajardo, Puerto Rico. Este es el evento de mayor altura registrado hasta el día de hoy (vea Tabla 1). El evento está asociado al paso de una onda tropical por el área de Puerto Rico. Fue generado por un pulso en la presión atmosférica de 0.4 mb. El pulso se desplazó a 35 MPH desde el ESE, discurrió unos 50.8 km en un trayecto a lo largo de la plataforma insular entre Vieques y Fajardo. El acoplamiento entre el pulso atmosférico y la ola larga barotrópica facilitó que durante el trayecto la resonancia de Proudman (1929) incrementara la amplitud de la ola, desde -0.4 cm hasta 1.8 cm. Luego en el Puerto de Fajardo, nuevamente la amplitud del meteotsunami aumentó 13.15 cm debido a la segunda resonancia con el Puerto de Fajardo. Para alcanzar una amplitud final igual a 14.95 cm.

Diagrama del meteotsunami que impactó el Puerto de Fajardo. No está a escala.



Introducción

El término meteotsunami se usa para designar una serie de ondas en un puerto o bahía que tienen frecuencia y amplitud similar a la de un tsunami generado por terremotos, deslizamientos o erupción volcánica, pero a diferencia de estos, su origen se asocia a un disturbio atmosférico tales como: ondas gravitacionales atmosféricas, un pulso en la presión barométrica, el paso de un frente, o de una línea de fuertes vientos (*squall*); capaces de generar una ola larga barotrópica en mar abierto, entrar en resonancia con ella y amplificarla a medida que se acerca a la costa. Una vez alcanza la entrada del puerto o bahía es capaz de forzar una serie de ondas, que entran en una segunda resonancia con el puerto (o bahía) que las amplifica aún más. El meteotsunami solamente ocurre en ciertos puertos y bahías donde es posible esta doble resonancia. Una excelente defensa de la controversia si esto es o no es un tsunami es presentada por S. Monserrat et al. (2006).

En años recientes en Puerto Rico se han reportado meteotsunamis generados localmente (Alfonso-Sosa, 2012) y en las aguas al Este de los Estados Unidos y que viajan con una rapidez igual a 455 MPH hasta llegar a Puerto Rico (Alfonso-Sosa, 2014). Los eventos locales han sido generados por disturbios atmosféricos tales como: ondas tropicales, huracanes y saltos en la presión atmosférica. El meteotsunami en el Puerto de Fajardo, es el de mayor altura registrada hasta el día de hoy. A continuación presentamos una tabla con los eventos de meteotsunami ocurridos en Puerto Rico:

Tabla1. Lista de eventos de meteotsunami registrados en Puerto Rico.

List of Meteotsunami Events in Puerto Rico					
Time of Max Height (LST)	Location	Height (feet)	Height (cm)	Atmospheric Event	Generation Area
8/16/2011 16:30	Bahia Salinas	0.61	18.6	Tropical Wave	Local
8/23/2011 11:06	Bahia Salinas	0.25	7.6	Hurricane Irene	Local
4/11/2013 1:09	Mona Island	0.50	15.3	Derecho	US East Coast
6/13/2013 16:53	Mona Island	0.30	9.0	Derecho	US East Coast
9/30/2013 2:48	Magueyes Island	0.28	8.5	Atm. Pressure Jump	Local
8/8/2014 12:53	Fajardo Harbor	0.98	29.9	Tropical Wave	Local

Data compiled by Dr. Edwin Alfonso-Sosa, Ocean Physics Education, Inc., 2014

Registro de observaciones durante el meteotsunami del 8-AGO-2014 en el Puerto de Fajardo

La estación mareal número 9753216 de NOAA/NOS/CO-OPS registró a las 12:53 LST (16:53 GMT) un repentino salto de 20 cm en la altura del agua, ocurrió poco menos de una hora después de la bajamar a las 12:00 LST (16:00 GMT) (vea Figura 1). La serie de tiempo de la altura del agua fue analizada usando el método de Descomposición en Modos Empíricos (EMD) (Huang et al, 1998). Se obtuvieron 11 componentes, pero en la Figura 2 solamente se muestran los primeros seis (C1 a C6) y la señal original para comparar. El componente C6 es la marea, cuando combinamos los componentes C1 al C5, reconstruimos la señal del meteotsunami, descartando a la marea (Figura 3). Una vez aislada la señal del meteotsunami, podemos determinar su altura. La altura alcanzó los 29.9 cm a las 12:53 LST (16:53 GMT) y se observa que unos 51.7 minutos más tarde ocurre un segundo pico de mucho menor altura. El

intervalo de tiempo entre los dos picos es igual a la mitad del periodo natural de oscilación del seiche costero entre Fajardo y Vieques.

Tabla 2. Velocidad del viento y velocidad de traslación del disturbio atmosférico, U.

Location	NOAA/NOS/CO-OPS	LAT	LON	Speed (kn)	Gusts (kn)	DIR (°)	Time of Max WS	Δx (miles)	Δt (hours)	U (MPH)
Fajardo Harbor	Sta. 9753216	18° 20.1' N	65° 37.8' W	15.16	27.02	ESE (123°)	8/8/14 16:48			
Isabel II Harbor	Sta. 9752619	18° 09.1' N	65° 26.6' W	16.33	27.02	SE (128°)	8/8/14 16:18	17.43	0.5	34.9

Los datos meteorológicos de la estación 9753216 tales como: velocidad del viento, temperatura del aire y la humedad relativa se muestran en la Figuras 4-6 (No hay datos de presión atmosférica). A partir de las 12:00 LST (16:00 GMT), aumentan las fluctuaciones en los valores. La temperatura desciende desde 83.1° F a la 12:00 LST (16:00 GMT) hasta 78.4°F, a las 12:36 LST (16:36 GMT). A las 12:48 (16:48 GMT), el viento cambia del E a ESE (123°) con una magnitud de 15 nudos y las ráfagas de viento alcanzan los 27 nudos (31 MPH). El campo de fuertes vientos asociado a la onda tropical fue tele-detectado por el sensor ASCAT, unas 2.5 horas antes del súbito incremento en los vientos en el puerto (Figura 7). Estaba localizado a ESE (115° T) del Puerto de Fajardo, a una distancia 103.7 millas. El sensor MODIS/Aqua pudo tele-detectar el campo de nubes y resuelve las tronadas (nubes cumulonimbos) que se movieron desde el ESE hasta pasar sobre el Puerto de Fajardo (Figura 8). Basándonos en la información previa, podemos suponer que el pulso de presión se aproximó al Puerto de Fajardo desde el ESE. La Tabla 2 muestra que media hora antes (0.5 h), a las 12:18 LST (16:18 GMT), en el Puerto de Isabel II, Vieques, los vientos habían aumentado a 16 nudos y habían cambiado su dirección a SE (128°), las ráfagas alcanzaron los 27 nudos, igual que en el Puerto de Fajardo. Las dos estaciones están separadas por 17.43 millas, estos datos sustentan que la rapidez de traslación del pulso de presión atmosférica, U, fue 34.9 MPH. Debido a que no había datos de presión atmosférica en Isabel II, usamos los datos de la estación 9752695, localizada en Esperanza, unos 7 km al SSO de la primera, en la costa sur de Vieques (Tabla 3).

Tabla 3. Cambio en Presión Atmosférica registrado en la estación 9752695, en Esperanza, Vieques.

Observations at Esperanza	Sta. 9752695	p (mb)	Δp (mb)
Start Rising Barometric Pressure	8/8/14 15:54	1017.7	
Maximum Barometric Pressure	8/8/14 16:00	1018.1	0.4

A las 11:54 LST (15:54 GMT) ocurre un pulso en presión atmosférica de 0.4 mb, en un intervalo de solamente 6 minutos. Si la rapidez del disturbio es 34.9 MPH (0.94 km min^{-1}) y el intervalo de tiempo es 6 minutos, quiere decir que la distancia entre el frente y el pico en la presión atmosférica es de 5.64 km, L_1 .

Velocidad del Meteotsunami

Las observaciones reportadas arriba, demuestran que el pulso de presión de 0.4 mb se desplazó desde el ESE hasta llegar al Puerto de Fajardo (Vea Figura 9). El pulso recorrió un trayecto de 50.77 km, partiendo desde el veril, al Este de Vieques, hasta llegar al Puerto de Fajardo. La dirección del trayecto es de 115° T relativa al Puerto de Fajardo. A lo largo de ese trayecto, el pulso de presión atmosférica y una onda larga barotrópica se acoplaron y entraron en Resonancia de Proudman. La profundidad promedio a lo largo

del trayecto es alrededor de H=25 m y una ola larga barotrópica moviéndose a lo largo de ese trayecto tiene una celeridad, C, igual a:

$$C = \sqrt{gH}$$

tal que $g= 9.81 \text{ m s}^{-2}$ y $H=25 \text{ m}$. La celeridad de la ola larga es igual a 15.7 m s^{-1} , equivalente a 35.0 MPH. Debido a que la rapidez de traslación del pulso de presión atmosférica, U, fue 34.9 MPH, la similitud de la velocidades garantiza Resonancia de Proudman entre la ola larga y el pulso atmosférico. Si la rapidez de la ola es 35 MPH, el tiempo en recorrer los 50.77 km (31.55 mi) es igual a 54 minutos. Dado que el intervalo de tiempo entre los dos picos del meteotsunami fue de 51.7 minutos, es posible que el segundo pico sea la respuesta a una segunda ola que se movió a lo largo del mismo trayecto y con la misma rapidez que la primera.

Amplitud de la ola larga barotrópica

Inicialmente, antes de llegar al veril, las aguas son mucho más profundas (>300 m) y la ola larga es más rápida que el disturbio, por lo tanto no hay resonancia y la amplitud de la ola es muy pequeña. Usando el efecto de barómetro invertido, sabemos que un incremento de 4 mb solamente genera una depresión de la superficie de amplitud negativa igual a -0.004 m (-0.4 cm). Pero cuando esa ola comienza a trasladarse sobre la plataforma, la ola reduce su rapidez a 35 MPH, el acoplamiento con el pulso que se desplaza a 34.9 MPH permite la resonancia y la amplitud de la ola incrementa rápidamente.

Tabla 4. Cálculo de la amplitud de la ola larga antes de llegar al Puerto. Para el caso del meteotsunami de Nagasaki y para el caso del Puerto de Fajardo.

Hibiya-Kajiura Equation for amplitude of Meteotsunami (1982)												
Location	Date	Atm. pressure Jump at the sea surface Δp (mb, hPa)	Convert Δp from hPa to Pa or to (N/m)	Mean density of Sea Water ρ (kg/m ³)	Static inverted Barometer Response, $\Delta \eta^*$ (m)	Distance from the pressure maximum to the front L_1 (m)	Distance travelled by the front x_f (m)	Maximum elevation of the water level $\Delta \eta$ (m)	Amplification factor $ \Delta \eta / \Delta \eta^* $	Depth of platform H (m)	Long Wave Celerity C (m/s)	Long Wave Celerity C (MPH)
Nagasaki Bay, Japan	31-Mar-79	3	300	1023	-0.030	3.00E+04	3.00E+05	1.49E-01	5.0	100	31.3	70.1
Fajardo, Puerto Rico	8-Aug-14	0.4	40	1022.6	-0.004	5.64E+03	5.08E+04	1.80E-02	4.5	25	15.7	35.0
							Length of Platform along 115°T					

Usando la ecuación de Hibiya-Kajiura (1982):

$$\Delta \eta = - \left(\frac{\Delta \eta^*}{L_1} \right) \frac{x_f}{2}$$

podemos calcular la amplitud de la ola justo antes de llegar al Puerto de Fajardo (vea Tabla 4). El trayecto de 50.77 km incrementó la amplitud hasta 0.018 m (1.8 cm). Esto equivale a un factor de amplificación igual a 4.5, un poco menos que el observado en Nagasaki (5.0). Conociendo que el meteotsunami alcanzó una amplitud final igual a 14.95 cm, suponemos que los 13.15 cm de diferencia se deben exclusivamente a la segunda resonancia con el Puerto de Fajardo. Esto supone que el Puerto de Fajardo es propenso a amplificar este tipo de meteotsunami. La resonancia del puerto depende de la

forma del puerto. La entrada SE del Puerto de Fajardo es bien estrecha (Vea Figura 10, Flecha). Si la entrada al puerto es estrecha o hay un gradiente marcado en profundidad, estas características lo hacen más susceptible a un meteotsunami (Montserrat, 2006). En el pasado hemos medido la escala de tiempo de los seiches en el Puerto de Fajardo, el rango de los valores es entre 46 y 73 minutos. Los dos picos en la altura del agua registrados por el mareógrafo del puerto y que fueron excitados por el meteotsunami están separados entre sí por unos 51.7 minutos. Cualquier meteotsunami con periodo dentro de ese rango va a ser amplificado significativamente. Para el caso que estudiamos el puerto amplificó 8.3 veces la amplitud de la ola. Este último dato es muy importante ya que nos permite estimar la amplitud de otro meteotsunami en ese mismo puerto, si medimos o calculamos su amplitud afuera en la plataforma.

Conclusión

Un meteotsunami es un tsunami generado por un disturbio atmosférico. El meteotsunami del 8/8/2014 en el Puerto de Fajardo constituye el evento de mayor altura registrado por un mareógrafo en Puerto Rico, hasta el día de hoy. El meteotsunami es el primero reportado en ese puerto, pero es probable que hayan ocurrido otros eventos en el pasado y que hayan pasado desapercibidos por la población. La resolución temporal de los mareógrafos de NOAA/NOS/CO-OPS ($dt = 1$ min.) hacen fácil la detección de estos eventos en el puerto o bahía donde ocurren. Por el contrario, detectar la ola del meteotsunami mientras ésta viaja sobre la plataforma es mucho más difícil, ya que su amplitud es muy pequeña, menor de 2 cm, y puede pasar desapercibida. Peor aún, en el caso del océano profundo (> 300 m), donde la ola tiene una amplitud menor de 1 cm, la detección de la misma no es posible con el equipo disponible al momento en esa región. El meteotsunami se desplazó a 35 MPH a lo largo de la plataforma entre Vieques y Fajardo, y dado que la distancia recorrida es 31.5 millas, implica que el tiempo de aviso de tsunami es de 54 minutos; solamente si detectamos la ola justo cuando acaba de entrar en la plataforma. Todo esto hace muy difícil el aviso de meteotsunami, y obviamente las personas no podrán ser alertadas. Hasta el momento, la altura de los meteotsunamis en Puerto Rico se ha mantenido por debajo de los 30 cm (~ 1 pie) y no se han reportado daños provocados por los mismos. Es posible que los meteotsunami ocurran con bastante frecuencia, pero debido a su pequeña altura pasan desapercibidos por la mayoría de la población. No obstante debemos de mantenernos vigilantes y seguir estudiándolos.

Referencias

Alfonso-Sosa, Edwin, 2012. Primer Reporte de un meteotsunami en la costa caribeña de Puerto Rico. Ocean Physics Education, Inc., 24 pp.

https://www.academia.edu/4951196/Primer_Reporte_de_un_Meteotsunami_en_la_Costa_Caribena_de_Puerto_Rico

Alfonso-Sosa, Edwin, 2014. *Calculating the Speed of a Transatlantic Meteotsunami on June 13, 2013*. Ocean Physics Education, Inc., 9 pp.

https://www.academia.edu/5592148/Calculating_the_Speed_of_a_Transatlantic_Meteotsunami_on_June_13_2013

Alfonso-Sosa, Edwin, 2014. Meteotsunamis golpean a Puerto Rico. La Regata, Año 2014, Vol. 16 No.1 p.28. <http://www.laregatapr.com/links/arch.pdf/1401.pdf>

Alfonso-Sosa, Edwin, 2014. *Coastal Oscillations after the Passage of Hurricane Irene*. Ocean Physics Education, Inc., 14 pp.

http://www.academia.edu/6216087/Coastal_Oscillations_After_the_Passage_of_Hurricane_Irene

Huang, N. E., Shen, Z., and S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proc. R. Soc. London Series A 454: 903-995.

Hibiya T. and K. Kajiura, 1982. Origin of the Abiki Phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay. Journal of the Oceanographic Society of Japan, Vol. 38, pp. 172-182.

Monserrat S., I. Vilibić, y A. B. Rabinovich, 2006. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 6, 1035–1051.

<http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/1035/2006/>

Proudman, J., 1929. The effects on the sea of changes in atmospheric pressure, Geophys. Suppl. Mon. Notices R. Astr. Soc., 2(4), 197–209.

Referencias Electrónicas:

NOAA/NOS/CO-OPS Web site: <http://tidesandcurrents.noaa.gov/>

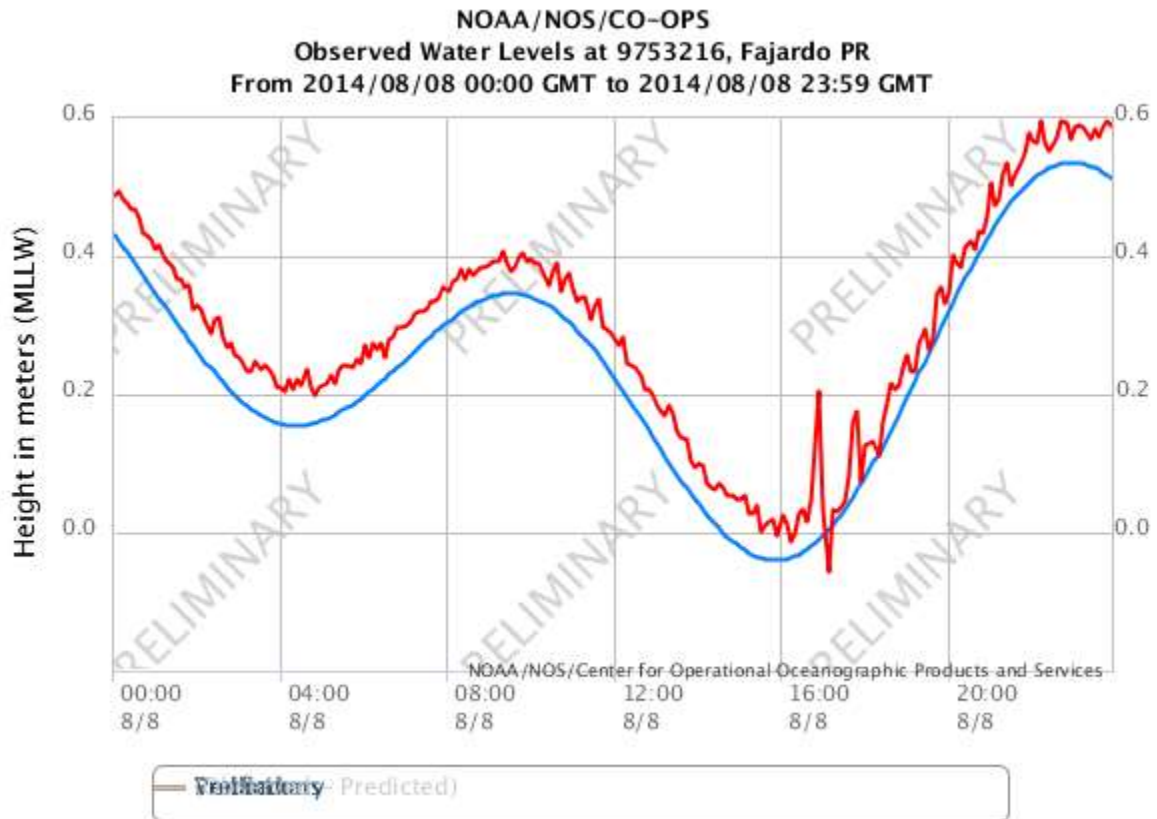


Figura 1. La estación mareal número 9753216 de NOAA/NOS/CO-OPS registró a las 12:53 PM (16:53 GMT) un repentino salto de 20 cm en la altura del agua.

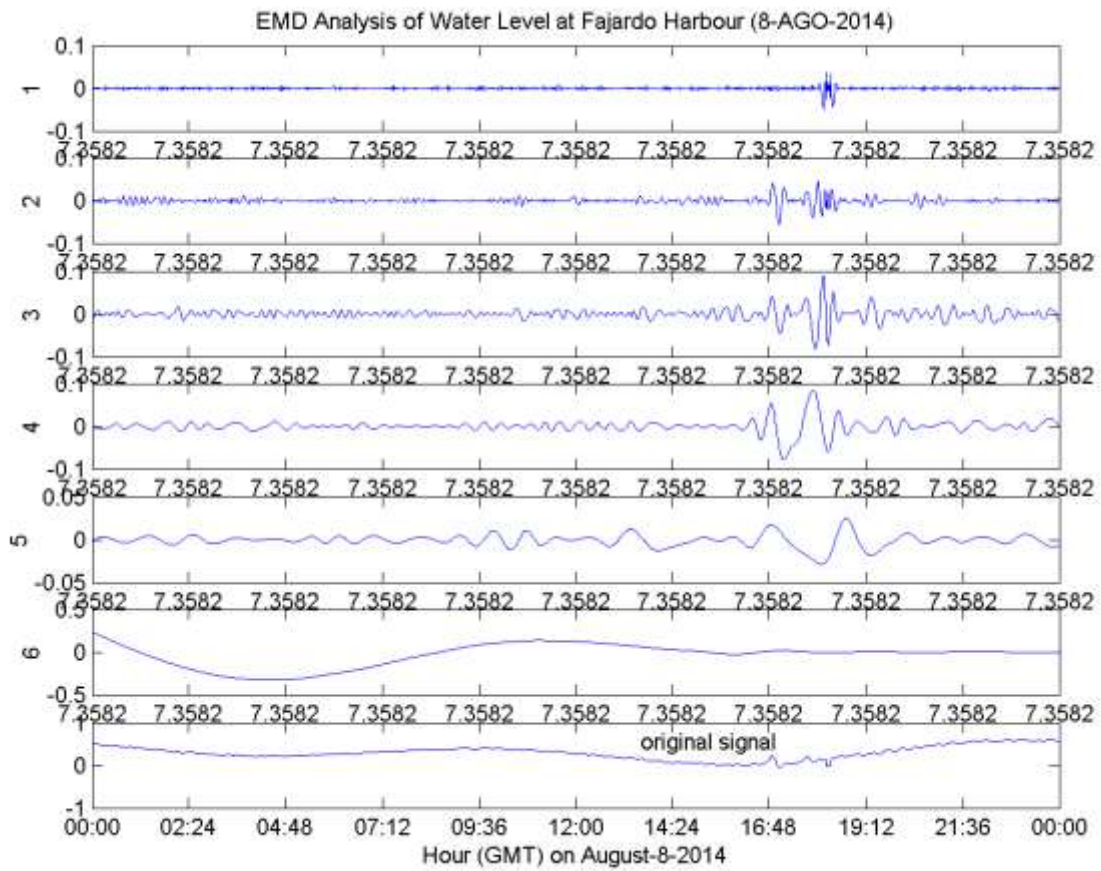


Figura 2. Análisis EMD de la altura del agua medida por el mareógrafo.

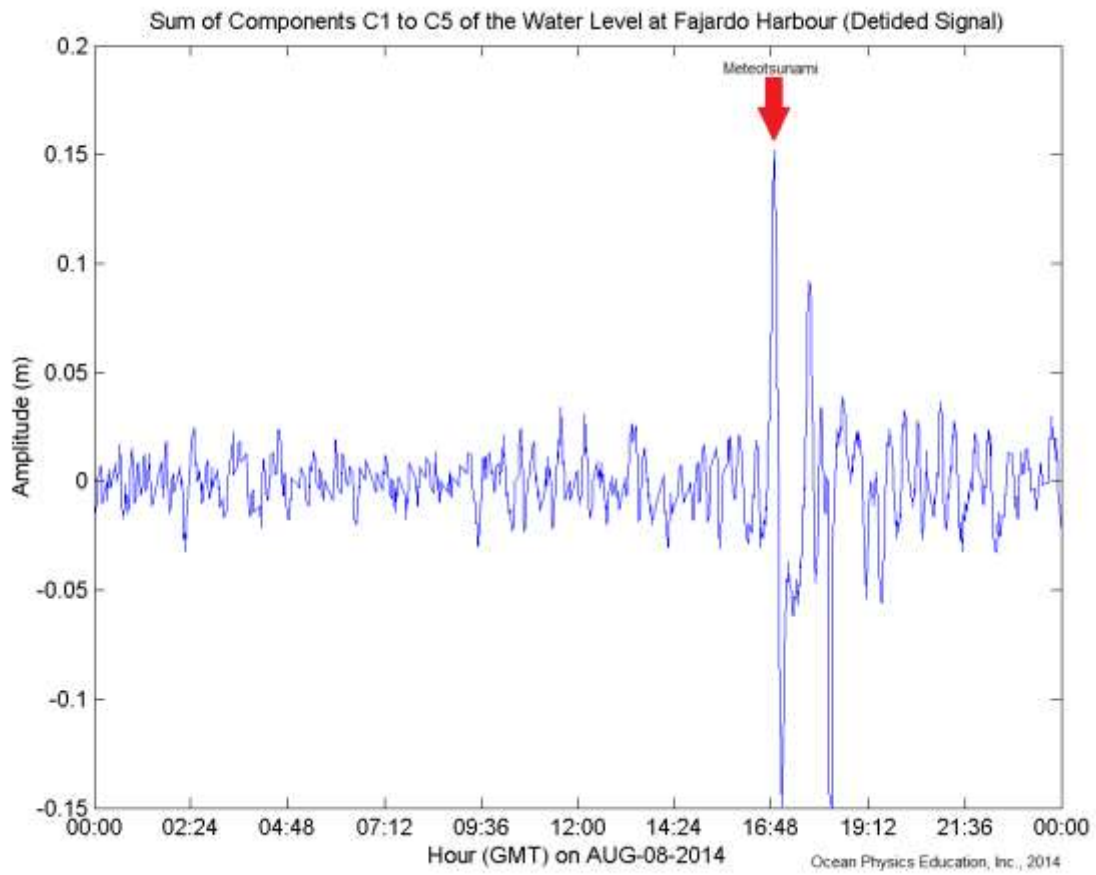


Figura 3. Meteotsunami en el Puerto de Fajardo (Flecha Roja).

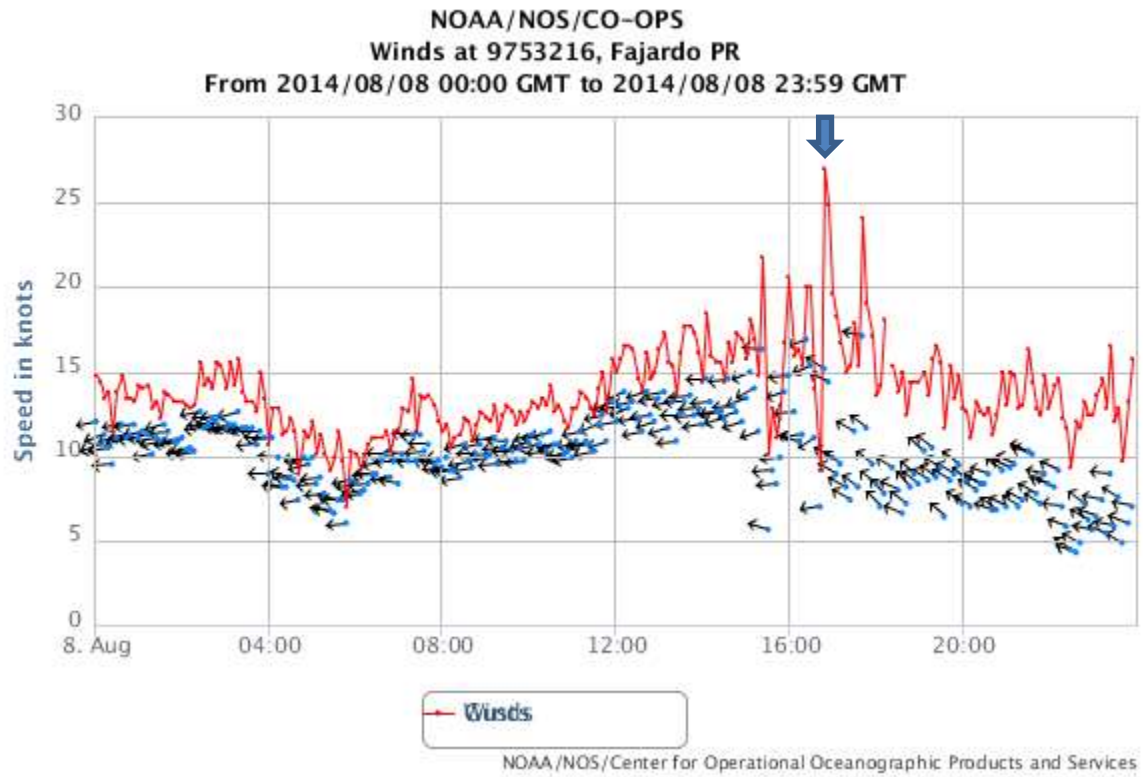


Figura 4. Incremento en los vientos (vectores) y en las ráfagas (rojo).

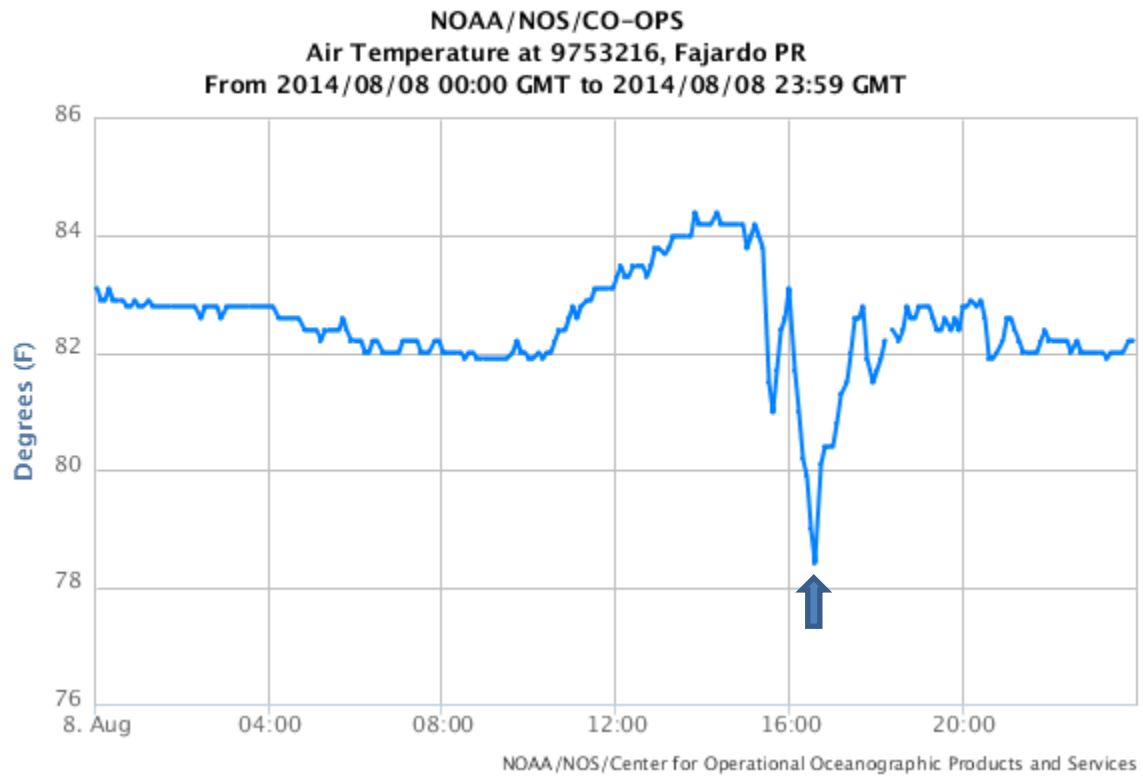


Figura 5. Temperatura desciende rápidamente.

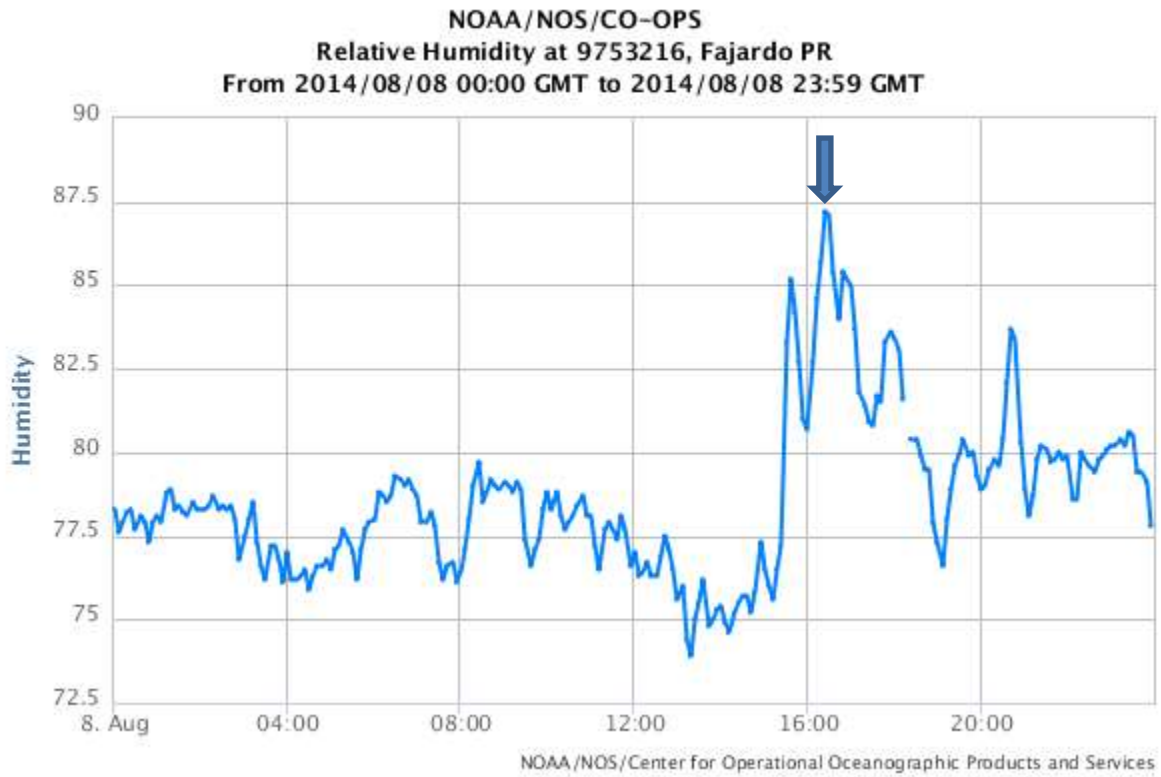


Figura 6. Humedad relativa incrementa rápidamente.

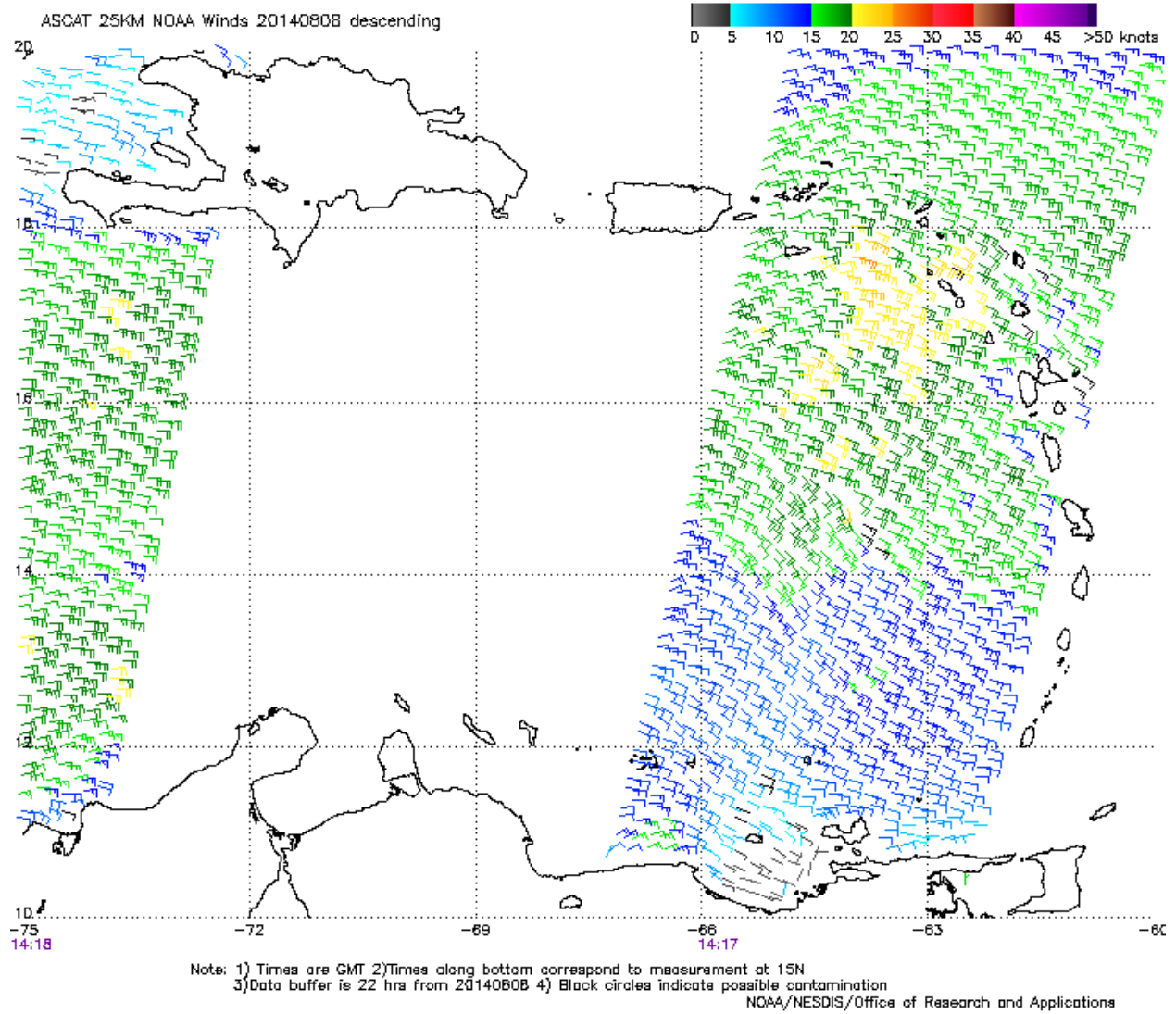


Figura 7 Concentrado Campo de Vientos al Este de St. Croix. Los vientos fuertes son predominantemente del ESE.

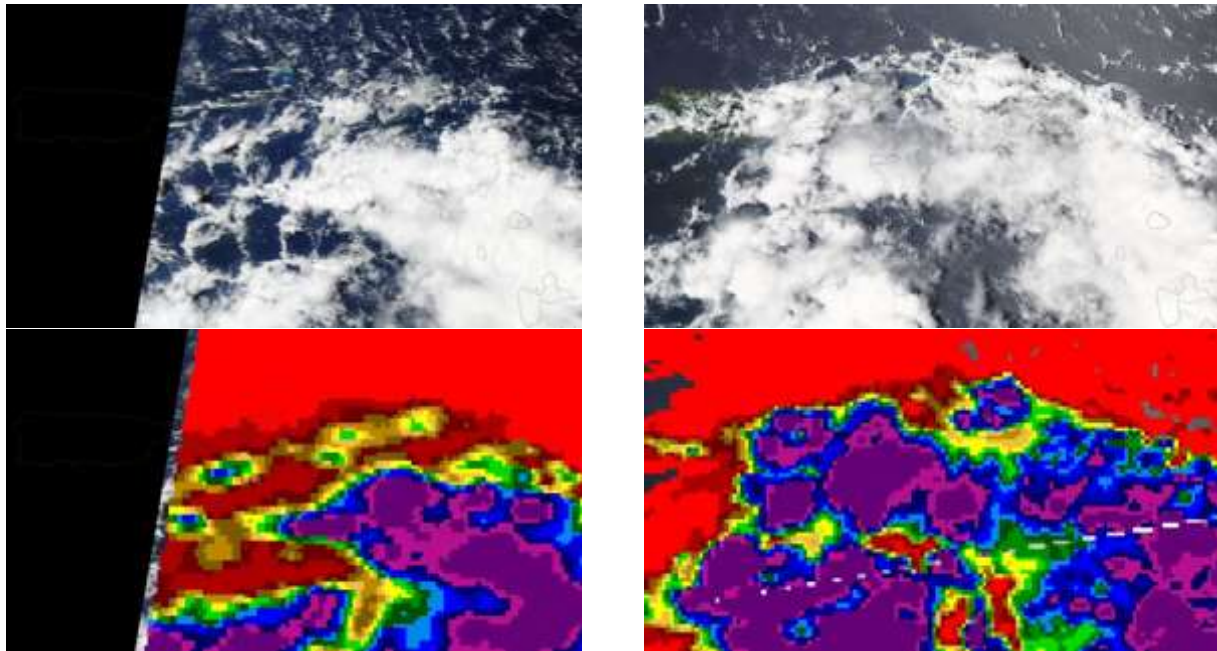


Figura 8. Dos imágenes de la onda tropical tomada por el sensor MODIS/Aqua/Terra separadas por un intervalo de dos horas. El desplazamiento de las nubes de la onda tropical señala una trayectoria ESE. Abajo en colores se muestra la temperatura del tope de las nubes.



Figura 9. Trayecto del pulso de presión atmosférica desde el veril de la plataforma hasta llegar al Puerto de Fajardo. Abarca una distancia de 50.77 km con una dirección de 115° T relativo al Puerto de Fajardo.

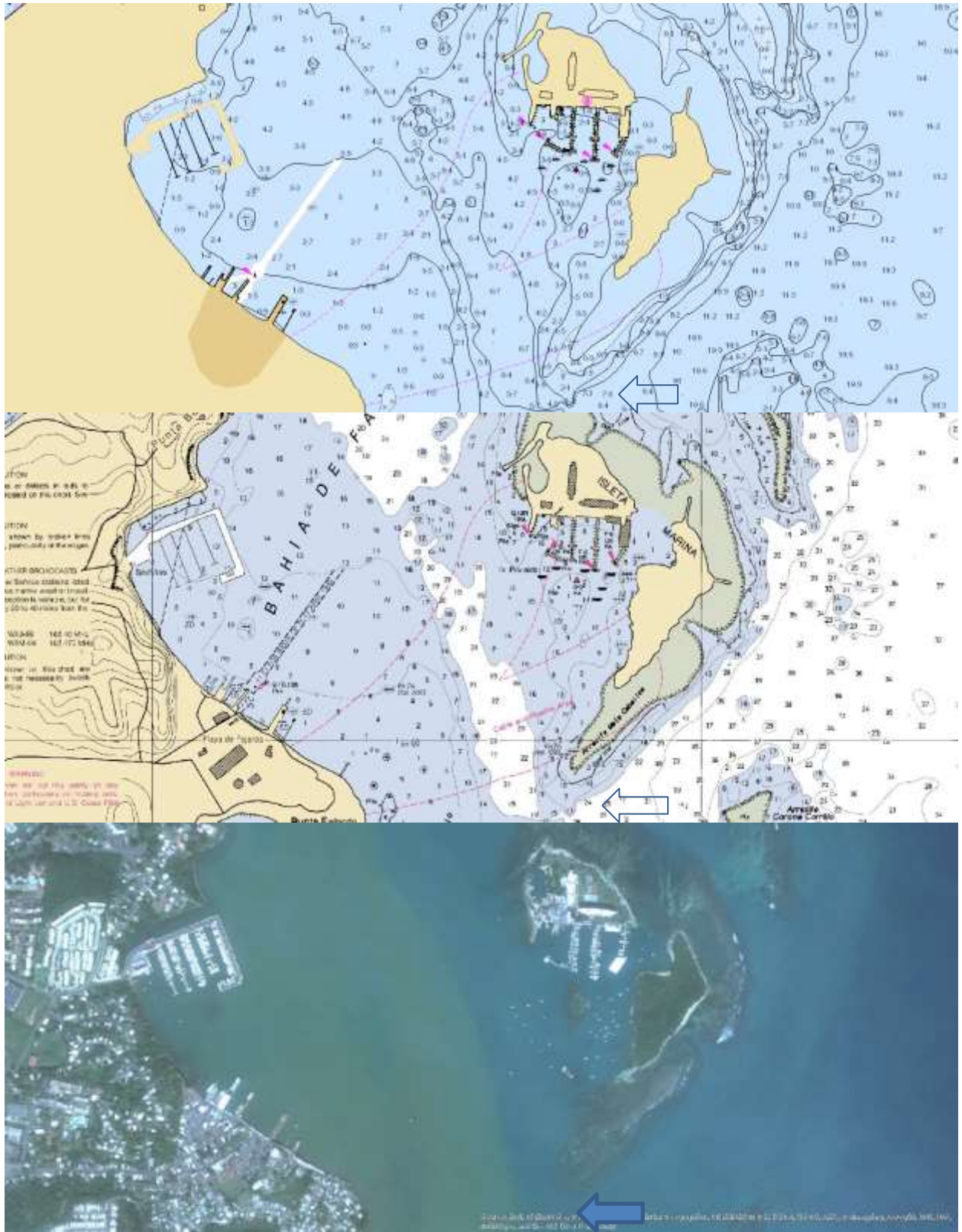


Figura 10. Puerto de Fajardo.