

Fenómenos Oceánicos en Puerto Rico

Por

Edwin Alfonso-Sosa, Ph.D.

Ocean Physics Education, 2016

Introducción sobre los Fenómenos Físicos Oceánicos en Puerto Rico

De acuerdo al Diccionario de la Lengua Española, la palabra fenómeno se origina del lat. tardío *phaenomēnon* 'síntoma', 'fenómeno astronómico', y este del gr. *φαινόμενον* *phainómenon*. La definición de ese Diccionario es: "Toda manifestación que se hace presente a la consciencia de un sujeto y aparece como objeto de su percepción". En nuestro caso particular trataremos los fenómenos que se manifiestan en el medio físico que es el océano. Muchos de estos fenómenos se manifiestan esporádicamente, temporamente y muchos pasan inadvertidos para el público. Tanto es el desconocimiento de estos fenómenos oceánicos, que alguno de éstos se ha descubierto recientemente su existencia. Gracias a la más reciente tecnología, estos fenómenos físicos pueden ser monitoreados y estudiados. La nueva percepción remota permite registrar la ocurrencia de los mismos y en algunos de éstos se ha podido establecer un patrón temporal o estacionalidad del mismo. Hasta este momento, hemos contabilizado por lo menos unos quince distintos fenómenos oceánicos que se manifiestan en las aguas que rodean el Archipiélago Borinqueño. Estos se pueden categorizar de acuerdo a la fuente de energía inmediata que sustenta el desarrollo del mismo. Se pueden clasificar dentro de las siguientes categorías: origen mareal astronómico u origen atmosférico.

Categorías

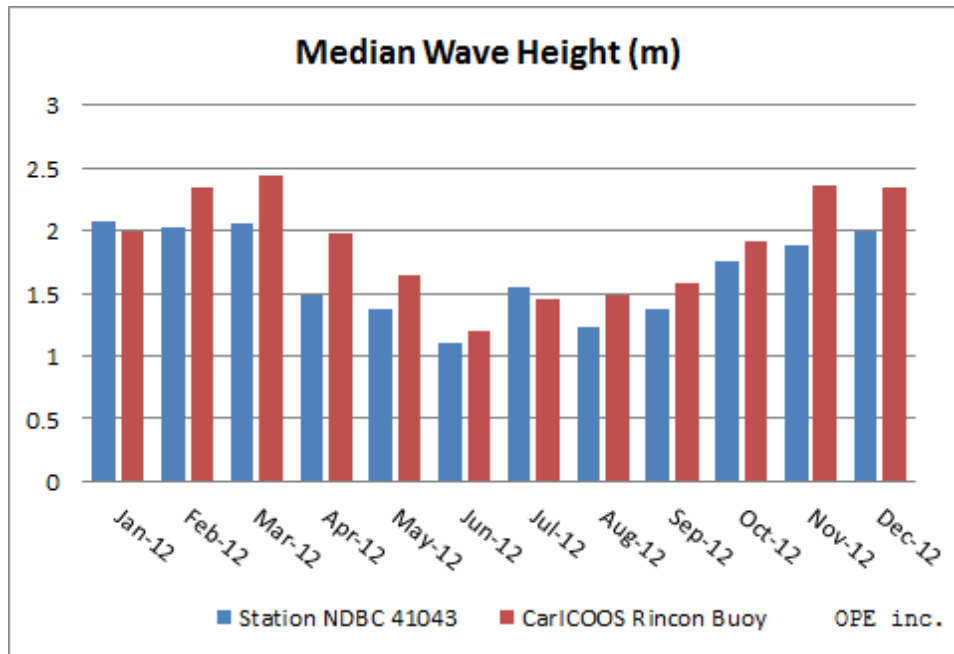
| Origen Mareal Astronómico | Origen Meteorológico |
|---------------------------|---|
| Marea Astronómica Extrema | Altas Marejadas de Periodo Largo ($T \geq 10$ s) |
| Olas Internas | Marea Ciclónica |
| Seiche Costero Extremo | Meteotsunamis |
| | Oleaje de Corto Periodo ($T < 10$ s) |
| | Llegada de masas de agua superficial asociadas- a la pluma del Rio Amazonas y del Rio Orinoco. |

Dentro de la primera categoría es obvio que hay que incluir las mareas astronómicas extremas, ya sea la pleamar más alta o la bajamar más baja, que superan el esperado rango máximo quincenal. También en esta categoría incluimos a las olas internas, ya sean las de periodo mareal, como lo son las mareas internas, o las olas solitarias internas (solitones internos Kd-V), que se derivan de las anteriores. Finalmente, incluimos a los seiches costeros extremos, que fueron reportados por primera vez en Puerto Rico en el año 1901, por Rolling Arthur Harris (1907). Dentro de la categoría de origen atmosférico incluimos a las marejadas de periodo largo (mayor o igual a 10 s) que ocurren en otoño e invierno, la

marea ciclónica generada por un sistema tropical, los meteotsunamis locales y transatlánticos. También en esta categoría incluimos la llegada de las aguas asociadas a la pluma de descarga del Río Amazonas y del Río Orinoco, ya que ambas son arrastradas por corrientes marinas superficiales que a su vez son forzadas por el patrón de vientos superficiales. Existe un fenómeno que aún no podemos categorizar debido a que desconocemos si es forzado por el viento o la marea, o por la combinación de los anteriores. Este fenómeno es la Oscilación Fajardo-Vieques, con una escala de oscilación entre 1.6 y 1.9 horas. Es importante destacar que algunos de estos fenómenos físicos hay que esperar varios años antes de que vuelvan a manifestarse, otros en cambio, presentan una regularidad estacional, que permite identificar cuáles son los meses del año cuando su frecuencia es mayor. Para estos últimos es posible preparar un calendario que resume su periodo de actividad. Este calendario permite coordinar nuestras actividades alrededor de los mismos.

Calendario de Fenómenos Físicos Oceánicos en Puerto Rico

A nuestras costas arriba continuamente la energía que recorre las profundas aguas oceánicas que rodean a Puerto Rico. Aquí en la isla, los surfistas disfrutan regularmente de las marejadas del noroeste que son generadas en el Atlántico Norte, por distantes tormentas durante el otoño y el invierno. Los puertorriqueños estamos familiarizados con la temporada de oleaje fuerte, con olas de un periodo largo ($T \geq 10$ s), que se extiende desde finales de octubre hasta mediados de abril. Por el contrario, desde mayo hasta septiembre, la actividad de oleaje es menor, no obstante el paso cercano de una fuerte tormenta o huracán puede alterar este periodo de relativa calma por varios días. El ciclo anual del régimen de oleaje es bien conocido por los habitantes de la costa noroeste de PR. Abajo mostramos una gráfica que traza completamente el ciclo anual de la altura del oleaje en Rincón, PR.



Ciclo anual de la altura media del oleaje en Puerto Rico. Las barras azules corresponden a los datos registrados en la Estación NDBC 41043, a unas 170 millas náuticas al NNE de San Juan, y las barras rojas a los datos registrados por la Boya de CarICOOS en Rincón (localizada a 1 milla del Faro de Rincón).

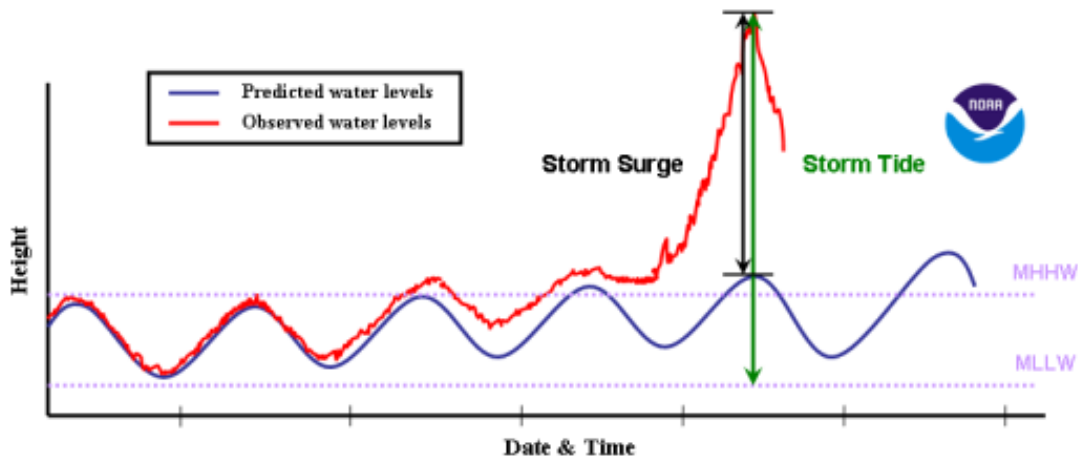
Existen otros fenómenos físicos oceánicos que también presentan un ciclo anual, pero éstos son desconocidos para la mayoría de los puertorriqueños. A continuación, presentamos un calendario que resume algunos de estos fenómenos oceánicos-costeros que afectan a Puerto Rico.

| Calendario de Fenómenos Físicos Oceánicos en Puerto Rico | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|--------------|-----|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fenómeno Físico Oceánico | MES | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| Marejadas otoñales e invernales ($T \geq 10$ s) | | [Barra azul] | | | | | | | | | | [Barra azul] | |
| Mareas ciclónicas por sistemas tropicales | | | | | | | | | [Barra roja] | | | | |
| Oleaje de periodo corto por S. tropicales ($T < 10$ s) | | | | | | | | [Barra roja] | | | | | |
| Pleamar más alta (mareas) | | | | | | | | | | | [Barra roja] | | |
| Bajamar más baja (mareas) | | [Barra azul] | | | [Barra azul] | | [Barra azul] | | | | | | [Barra azul] |
| Corrientes más fuertes (aguas del Sur y del Oeste) | | | | | | [Barra roja] | | | [Barra roja] | [Barra roja] | [Barra roja] | | |
| Seiches costeros extremos (Costa Sur) | | | | | [Barra roja] | [Barra roja] | [Barra roja] | | | [Barra roja] | | [Barra roja] | |
| Meteotsunamis locales | | | | | | | | | [Barra roja] | [Barra roja] | | | |
| Meteotsunamis transatlánticos | | | | | [Barra roja] | [Barra roja] | [Barra roja] | | | | | | |

Created by Edwin Alfonso-Sosa, Ph.D., 2014

Arriba el calendario indica con la barra de color la extensión de tiempo de cada uno de los fenómenos físicos oceánicos. Este calendario fue construido usando datos de muchos años de observación por parte del programa CarICOOS, CO-OPS del NOS de NOAA, del Programa DART y datos coleccionados y provistos por el autor de este documento.

Otro fenómeno de interés que aparece en la segunda posición en el calendario, son las mareas ciclónicas generadas por el paso de tormentas y huracanes por nuestra región. Por lo general, ocurren entre el mes de agosto y de octubre. Quiero aclarar, que podemos experimentar mareas ciclónicas incluso cuando el trayecto del huracán no pasa sobre Puerto Rico. Sistemas con presiones barométricas bien bajas, tal como fue el caso del huracán Gilbert (1988), pueden incrementar la altura del agua por el efecto de barómetro invertido, a pesar de pasar bastante distante del sur de PR.



La altura de la marea ciclónica observada incluye el efecto de la marea astronómica. Cortesía de NOAA.

| Nivel del Agua Máximo registrado en Isla Magueyes, La Parguera, Puerto Rico | | | |
|---|----------|------------------|--|
| Nombre | Clase | Fecha (LST) | Nivel del Agua Max. (ft) Relativo a MLLW |
| Isaac | Tormenta | 8/23/2012 20:00 | 1.8 |
| Dean | Huracán | 8/18/2007 16:00 | 1.4 |
| Alpha_2005 | Tormenta | 10/22/2005 16:00 | 1.2 |
| Ernesto | Tormenta | 8/3/2003 22:00 | 1.2 |
| Debby | Huracán | 8/22/2000 19:00 | 1.2 |
| Georges | Huracán | 9/22/1998 5:00 | 2.5 |
| Hortense | Huracán | 9/10/1996 9:30 | 1.7 |
| Hugo | Huracán | 9/19/1989 2:00 | 1.1 |
| Gilbert | Huracán | 9/11/1988 8:30 | 1.6 |

Ocean Physics Education, Inc. 2013

Altura máxima de la marea ciclónica registrada en la estación 9759110 de NOAA/NOS/CO-OPS de Isla Magueyes (1988-2013).

La marea ciclónica más alta (2.5 pies) ocurrió el 22 de septiembre del 1998, durante el azote del H. Georges por el SO de Puerto Rico.

En la tercera posición del calendario situamos a las olas de periodo corto ($T < 10$ s), ocupando los meses desde junio hasta octubre. La temporada de huracanes se extiende desde el primero de junio hasta el 31 de noviembre. Durante esos meses las ondas tropicales se aproximan desde el Este, a éstas les acompaña brisa fuerte (25-30 nudos) que es capaz de generar localmente olas de periodo corto.

En la cuarta posición del calendario ubicamos a las pleamares de mayor altura del año. Éstas generalmente ocurren en los meses de octubre y noviembre. La marea astronómica más alta entre los años 1995 al 2012, ocurrió el 6 de noviembre del 2006.

| Marea Astronómica Más Alta en Puerto Rico (1995-2012) | | | |
|---|-------------------|-----------------|--|
| Localización | Estación NOS/NOAA | Fecha (LST) | Nivel del Agua Max. (ft) Relativo a MLLW |
| Isla Magueyes | 9759110 | 11/6/2006 11:36 | 1.61 |
| USCG Compound, San Juan | 9755371 | 11/6/2006 9:54 | 2.68 |

Ocean Physics Education, Inc. 2013

Datos son de la estación 9759110 de NOAA/NOS/CO-OPS de Isla Magueyes (1995-2012) y de la estación 975371 en la Puntilla, San Juan.

Las bajamares más bajas se han reportado entre diciembre y enero, cuando estamos cerca del perihelio. También se han reportado durante abril y en junio-julio. La bajamar más baja ocurrió el 11 de junio del 1968 (-0.878 ft).

Basándonos en los pasados 4 años del registro de medidas de corriente del ADCP, instalado en la Boya PR-1 de CariCOOS-localizada al sur de Caja de Muertos, podemos identificar 10 eventos donde las corrientes tienen una magnitud mayor de 2 nudos (103.2 cm s^{-1}), éstas ocurren en el periodo que comprende desde finales de agosto hasta finales de octubre. En el calendario, este periodo se identifica con una banda púrpura. Abajo se desglosan los días de los eventos. Las fuertes corrientes responden a la marea de perigeo, marea ecuatorial, marea tropical y a la marea viva. Algunos eventos se combinan con el paso de ciclones tropicales, pero sus trayectos pasan a una distancia segura de la boya.

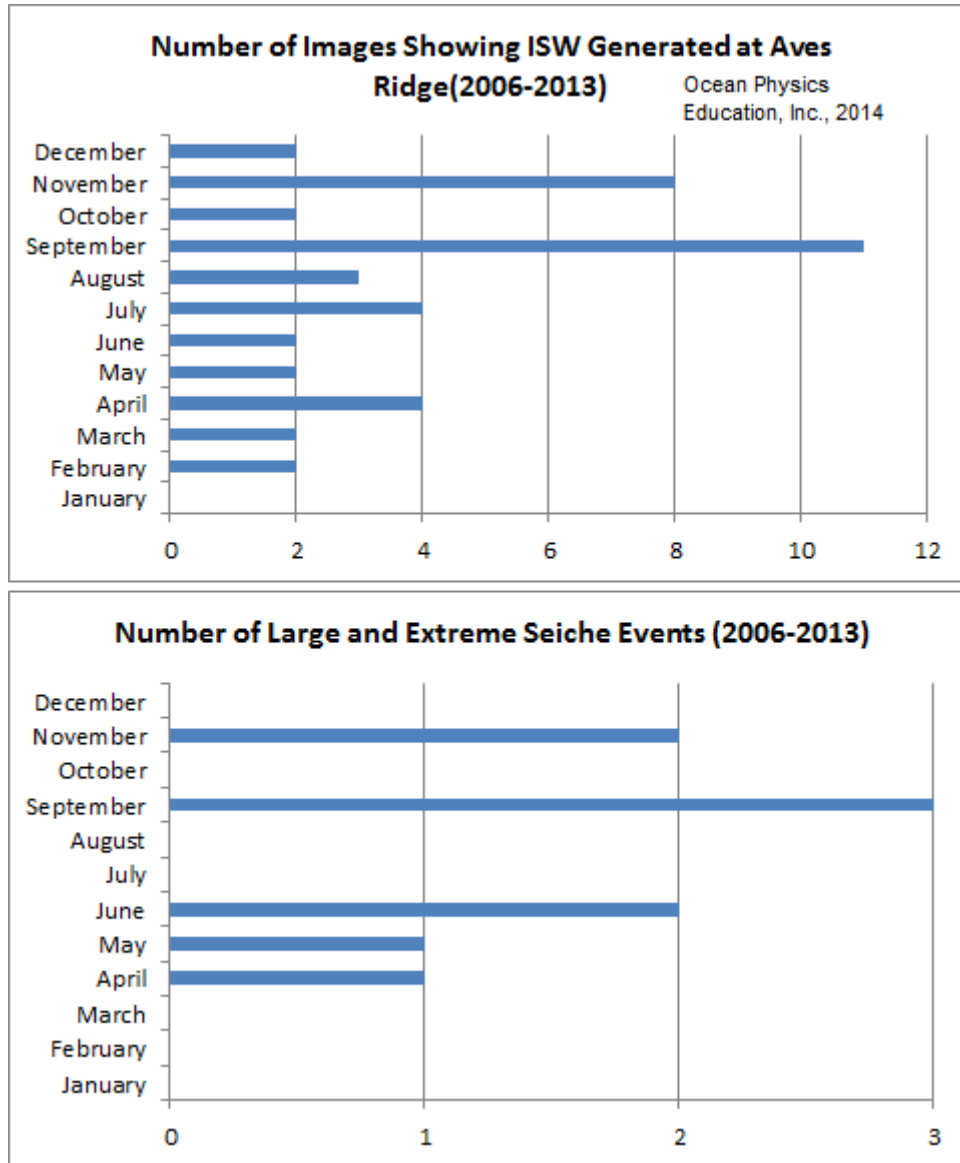
| Strong Current Events at PR1 CariCOOS Buoy, 3 km South of Caja de Muertos, Speeds ≥ 2.0 knots. | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|--------------|-----------------|------------------------------------|-------------------|--------------------------|------------------|-----------|-------------------|--------------------|-----------|
| Event Number | Date | Lunar Phase | Lunation (days) | Tide | Declination (Deg) | Distance From Earth (km) | Date | Depth (m) | Max. Speed (cm/s) | Max. Speed (knots) | DIR (DEG) |
| 1 | 8/22/2010 4:00 | | 12 | | -18.8 | 404964 | 8/22/2010 4:00 | 7 | 111.3 | 2.2 | 132 |
| 2 | 8/31/2010 12:00 | Last Quarter | 20 | Neap, Tropic, Hurricane Earl | 21.5 | 391548 | 8/31/2010 12:00 | 8 | 143.5 | 2.8 | 116 |
| 3 | 9/2/2010 6:31 | Last Quarter | 22 | Neap, Tropic | 24.4 | 375737 | 9/3/2010 1:00 | 7 | 142.4 | 2.8 | 293 |
| 4 | 9/8/2010 13:10 | New Moon | 0 | Spring, Equatorial, Perigean | 0 | 353153 | 9/8/2010 20:00 | 7 | 103.2 | 2.0 | 307 |
| 5 | 10/6/2010 10:10 | | 27 | Perigean | -2.8 | 355107 | 10/6/2010 18:00 | 8 | 111.1 | 2.2 | 95 |
| 6 | 9/12/2011 11:00 | Full Moon | 14 | Spring, Equatorial, T. Storm Maria | 0 | 407677 | 9/13/2011 10:00 | 9 | 138.0 | 2.7 | 119 |
| 7 | 9/27/2011 11:31 | New Moon | 29 | Spring, Perigean | -6.8 | 353852 | 9/27/2011 8:00 | 8 | 144.4 | 2.8 | 118 |
| 8 | 9/1/2012 13:10 | Full Moon | 15 | Spring, Equatorial | 0 | 393495 | 9/2/2012 21:00 | 7 | 155.2 | 3.0 | 145 |
| 9 | 10/18/2012 14:00 | | 3 | Tropic, Perigean | -21.5 | 359935 | 10/18/2012 23:00 | 7 | 113.2 | 2.2 | 316 |
| 10 | 10/25/2014 10:00 | New Moon | 1 | Spring | -15.8 | 384064 | 10/25/2014 10:00 | 8 | 131.3 | 2.6 | 107 |
| Ocean Physics Education, Inc., 2014 | | | | | | | | | | | |

Eventos de corriente fuerte con magnitud igual o mayor de 2.0 nudos. Registro del ADCP en la boya PR-1 de CariCOOS localizada al sur de Caja de Muertos.

Hasta el momento la corriente más rápida en PR-1 – con una magnitud de 3 nudos –ocurrió el 2 de septiembre del 2012 a las 2100 GMT, con un valor de 155.2 cm s^{-1} (3 nudos). Otra corriente fuerte de 113 cm s^{-1} fue detectada en el mes de junio, por el Dr. Jorge Capella en el *Tourmaline*, en el extremo nororiental de la plataforma insular de Cabo Rojo-Mayagüez.

En la séptima posición del calendario tenemos a los seiches costeros extremos, que son excitados por la llegada de paquetes de olas internas solitarias, que a su vez, se generan en la Cresta Submarina de Aves y hacen una travesía de 450 km - en 4 a 5 días - hasta golpear las pendientes submarinas del suroeste de Puerto Rico. Por lo tanto, la ocurrencia de seiches costeros extremos dependerá de la frecuencia con que se generen y lleguen hasta Puerto Rico esas olas internas de gran amplitud, con la energía suficiente para excitarlos. Abajo mostramos una gráfica que muestra la frecuencia de ambos fenómenos. Los seiches costeros extremos ocurren en el periodo de abril a mayo, y más tarde en septiembre y noviembre, donde aumenta la frecuencia de los mismos. También en septiembre y en noviembre el sensor satelital *MODIS/Terra/Aqua* ha detectado más frecuentemente las olas internas solitarias generadas en la Cresta de Aves. El seiche costero extremo de mayor altura (67.4 cm), llamado el Súper

Seiche, ocurrió el 9 de noviembre del 2006 en Isla Magueyes, tres días después de la marea astronómica más alta, a la que ya habíamos hecho referencia arriba.



Frecuencia de ocurrencia de olas internas solitarias y seiches costeros.

En la octava posición indicamos que los meteotsunamis son generados localmente en agosto y septiembre. Durante ese periodo, súbitos pulsos en presión atmosférica acompañan la llegada de ondas tropicales fuertes desde el Este. El pulso genera una ola en la superficie, que al propagarse sobre la plataforma insular con la misma rapidez que el pulso de presión atmosférico, le permite a la ola adquirir más energía y aumentar su amplitud; para luego llegar al puerto donde ocurre una segunda amplificación de la ola. En el Puerto de Fajardo es usual que ocurran meteotsunamis durante el mes de agosto (vea tabla abajo).

| Location | Date (GMT) | Atm. pressure Jump at the sea surface Δp (mb, hPa)* | Static Inverted Barometer Response, $\Delta \eta^*$ (m) | Arrival Time of Pressure Jump | Speed of Atmospheric Disturbance U (MPH) | Distance from the pressure maximum to the front L1 (m) | Distance travelled by the front xf (m) | 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 | -0.013 | 8/16/11 18:30 | 38.64 | 1.88E+04 | 5.08E+04 | 1.75E-02 | 1.4 | 35.0 | 0.0934 | 5.3 |
| Fajardo, PR | 8/17/11 2:42 | 0.6 | -0.006 | 8/17/11 2:42 | 32.20 | 1.04E+04 | 5.08E+04 | 1.46E-02 | 2.4 | 35.0 | 0.1261 | 8.7 |
| Fajardo, PR | 8/4/12 0:18 | 0.9 | -0.009 | 8/4/12 0:12 | 38.64 | 1.25E+04 | 5.08E+04 | 1.82E-02 | 2.0 | 35.0 | 0.1753 | 9.6 |
| Fajardo, PR | 8/4/12 4:24 | 0.6 | -0.006 | 8/4/12 4:18 | 38.64 | 6.26E+03 | 5.08E+04 | 2.43E-02 | 4.1 | 35.0 | 0.1204 | 5.0 |
| Fajardo, PR | 8/13/12 3:18 | 1.6 | -0.016 | 8/13/12 3:06 | 21.47 | 1.04E+04 | 5.08E+04 | 3.88E-02 | 2.4 | 35.0 | 0.1943 | 5.0 |
| Fajardo, PR | 8/8/14 16:53 | 0.4 | -0.004 | 8/8/14 16:48 | 34.86 | 5.65E+03 | 5.08E+04 | 1.79E-02 | 4.5 | 35.0 | 0.1495 | 8.3 |
| *Esperanza, Vieques | | | | Length of Platform along 115°T | | | | | | | | |

Lista de Meteotsunamis ocurridos en el Puerto de Fajardo durante los años 2011-2014.

Por último, el calendario muestra que los meteotsunamis trasatlánticos ocurren durante el mes de abril, mayo y la primera mitad de junio. Los meteotsunamis se generan en el veril de la plataforma continental a las afueras de New Jersey, durante la salida al océano de los **Derechos**. Estas tormentas de viento ocurren durante la primavera y generan una extensa banda de vientos que superan las 58 MPH y ráfagas de hasta 75 MPH. El Derecho se desplaza a 47 MPH de Este a Oeste. Cuando El Derecho sale al mar, comienza a impartir energía a la ola y una vez la ola se desprende del veril, ésta puede cruzar 1478 millas del Océano Atlántico en 3.25 horas, hasta llegar a las costas de Puerto Rico. La rapidez del meteotsunami puede alcanzar 455 MPH, pero en promedio es 427 ± 24 MPH. Abajo mostramos una tabla con los meteotsunamis trasatlánticos registrados por la estación de NOS/CO-OPS 9759938 localizada al oeste de Mona.

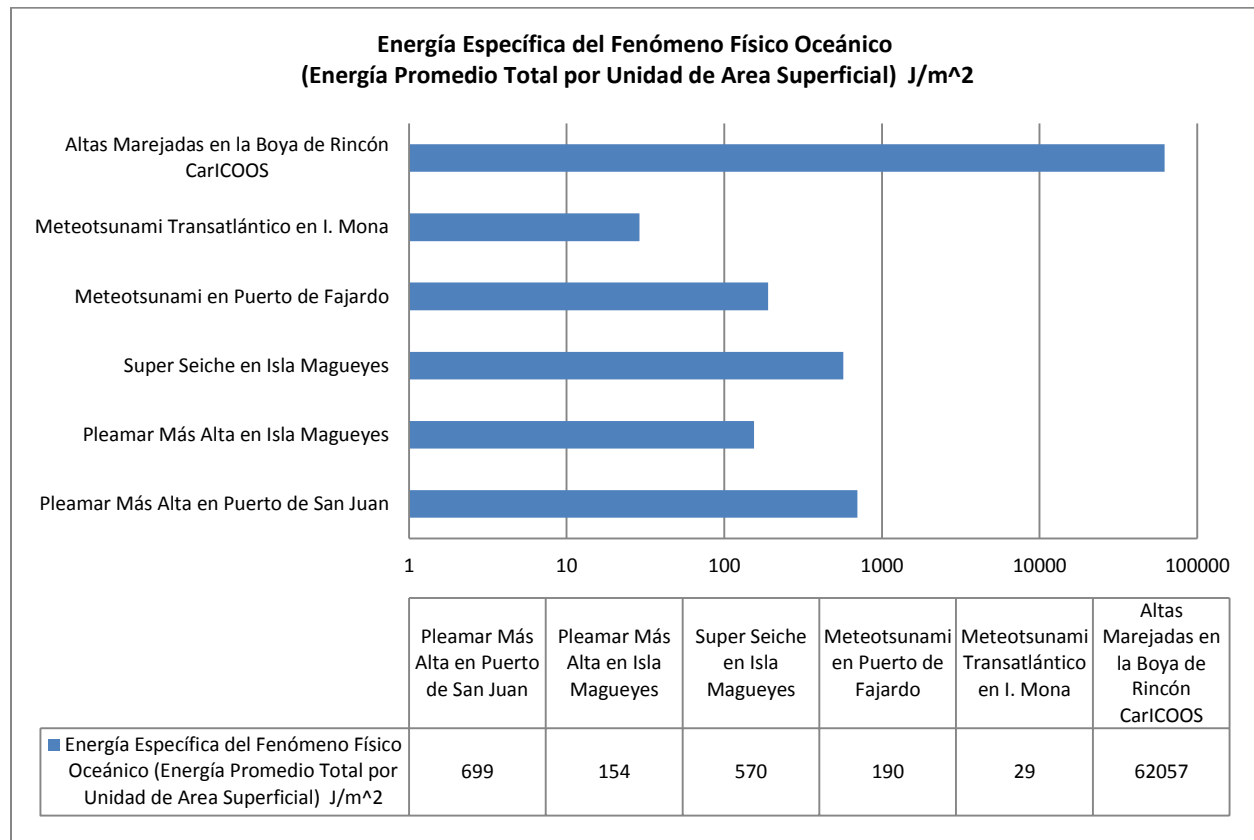
| Gauge | Start Meteotsunami | $\Delta x / \Delta t$ (MPH) | Height (cm) |
|--------------------|--------------------|-----------------------------|-------------|
| Mona Island | 5/14/2010 12:24 | 397.80 | 6.0 |
| Mona Island | 4/10/2013 13:06 | 422.43 | 12.0 |
| Mona Island | 4/11/2013 8:11 | 432.73 | 15.2 |
| Mona Island | 6/13/2013 20:19 | 455.31 | 12.0 |
| Average | | 427.07 | |
| Standard Deviation | | 23.86 | |

Rapidez y altura de los meteotsunamis transatlánticos detectados en isla de Mona.

El **Calendario de Fenómenos Físicos Oceánicos** intenta plasmar el ciclo anual de varios fenómenos que son desconocidos para la mayoría de los habitantes de Puerto Rico. Dado que vivimos en una isla es importante conocer los fenómenos oceánicos que nos afectan y cuando ocurren.

Comparación de la Energía de los Fenómenos Oceánicos Observados en Puerto Rico

Los Fenómenos Oceánicos pueden ser comparados de acuerdo a su energía por unidad de área al impactar las aguas costeras de Puerto Rico.



En Puerto Rico las marejadas de largo periodo que experimentamos durante el otoño e invierno son formidables agentes de cambio costero, su energía se disipa sobre los arrecifes y sobre las playas. Estas últimas sufren considerables cambios en sus perfiles de playa luego del impacto de estos eventos mayores de marejadas. Las mareas ocupan la segunda posición en energía en la costa, en particular en la costa norte. En tercer lugar tenemos el Súper Seiche, que es un seiche costero extremo que ocurre en la costa suroeste (La Parguera, Bahía de Guánica). Este evento tiene en la orilla de costa una altura comparable a la de la marea ciclónica del Huracán Georges (SEP-22-1998), tal como se muestra en la comparación en la siguiente figura. Ambos eventos fueron registrados por la misma estación mareal en Isla Magueyes, La Parguera.

Los meteotsunamis se desarrollan en las áreas con plataformas submarinas anchas tales como el Este de Puerto Rico (incluyendo a Isabel II en Vieques) y en la ancha plataforma al oeste de Cabo Rojo. Los seiches ocurren en puertos y bahías resguardadas del oleaje, su energía se disipa provocando oscilaciones en el puerto y pudiera dañar levemente las embarcaciones.

Los meteotsunamis transatlánticos que llegan a Puerto Rico son de baja energía y hasta este momento sólo han podido ser detectados por instrumentos.

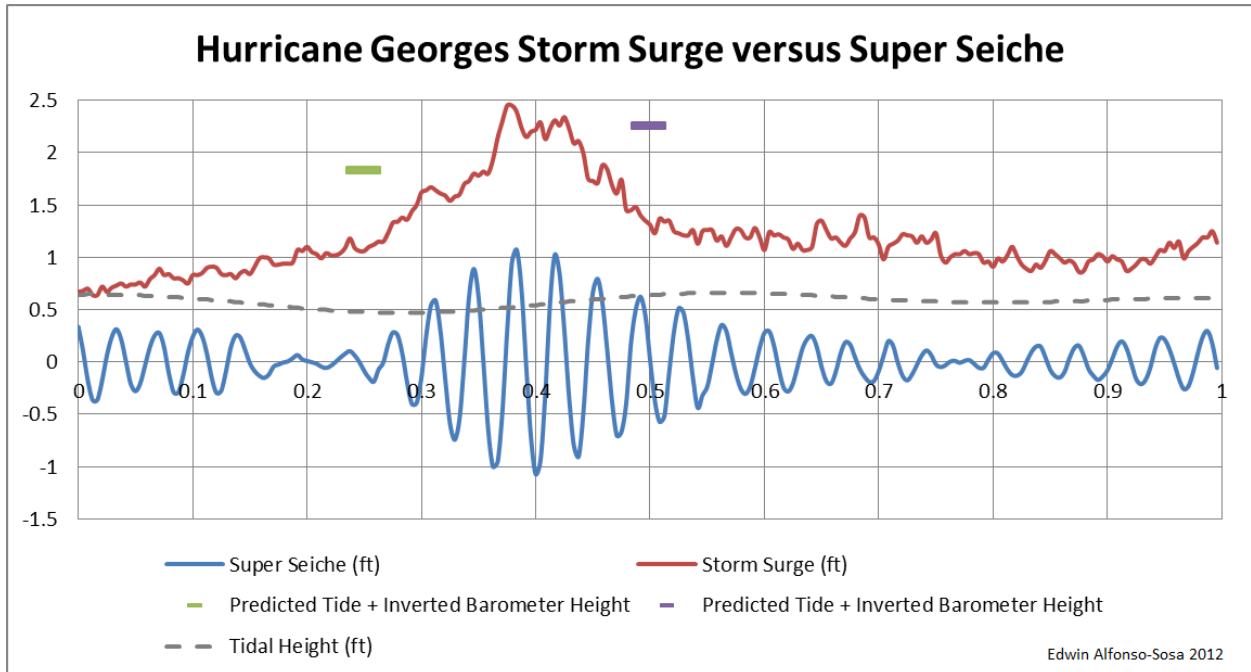


Figura. Comparación de la altura del Súper Seiche versus la altura de la marea ciclónica.

Referencias

[Gigantescas olas internas golpean las pendientes submarinas del suroeste de Puerto Rico](#). La Regata, Año 2012, Vol. 14 No. 9, p. 5

[Seiche de Magueyes, solitones de Aves, pluma del río Orinoco y la Luna](#). La Regata, Año 2013, Vol. 15 No. 10, p. 9

[Current Applications for an Array of Water Level Gauge Stations: New Discoveries in the Seiche Band and the Meteorological-Oceanic Band](#). PDF

[Current Applications for an Array of Water Level Gauge Stations: New Discoveries in the Seiche Band and Meteorological-Oceanic Band](#) (pptx file)

Meteotsunamis golpean a Puerto Rico. La Regata, Año 2014, Vol. 16 No. 1, p. 28. [JPEG](#)