



ARTÍCULO

## Observaciones de la marea atmosférica en Cartagena de Indias

### Observations of atmospheric tides in Cartagena de Indias

Fecha recepción: 2009-07-31 / Fecha aceptación: 2009-10-28

Iryna Lonina, oceanmet.ltda@yahoo.com

Sadid Latandret, slatandret@cioh.org.co

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH,  
Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, D.T. y C.

### Resumen

Se estudia la marea atmosférica con base en los datos de la presión barométrica, registrada en la estación automática del CIOH durante el período entre agosto de 2007 y julio de 2008. Aunque en el trópico, la variación diaria de la presión atmosférica es de mayor rango que en las latitudes altas, existe una opinión común de que el efecto de la marea atmosférica sobre el estado del tiempo es despreciable. Sin embargo, el análisis de los eventos de lluvias en distintas fases de la marea, muestra que se presenta una influencia de la marea en la evolución de las ondas tropicales y la precipitación asociada con ellas. La explicación del fenómeno se basa en la existencia de los sistemas de anfídomías en la marea atmosférica, inducidos por las oceánicas.

**Palabras claves:** Marea atmosférica, sistemas de anfídomías, ondas tropicales.

### Abstract

Atmospheric tides are studied based on barometric pressure data, registered on the CIOH automatic meteorological station during the period between August 2007 and July 2008. Even though daily variation of the atmospheric pressure in the tropics is higher than in upper latitudes, there exists a common opinion that the influence of atmospheric tides on the weather is negligible. Nevertheless, the analysis of rain events along different phases of the tide shows an influence of such tides over the evolution of tropical waves and precipitation associated with them. The explanation of this phenomenon lies on the presence of amphidromic systems in the atmospheric tides, induced by the oceanic ones.

**Key words:** Atmospheric tides, amphidromic systems, tropical waves.

## Introducción

Según Matveev [1], la variación diaria de la presión atmosférica es poco apreciable en comparación con los demás parámetros meteorológicos, tales como la temperatura del aire, su humedad, vientos y la radiación solar. Sin embargo, el análisis armónico permite determinar las oscilaciones con los períodos de 24, 12, 8 y 6 horas. Además, la onda de 12 horas tiene mayor amplitud y las oscilaciones diarias son más relevantes en los trópicos con una amplitud de 3-4 hPa. Por otra parte, en las latitudes altas, la variación diaria de la presión atmosférica no alcanza 1 hPa.

Según la fuente citada, las variaciones periódicas de la presión no juegan un papel importante en los procesos del tiempo atmosférico. Esto es cierto, en mayor medida, para las latitudes altas, donde la variación de la presión, relacionada con el movimiento de los sistemas béricos, es del orden de 10-20 hPa. Teniendo en cuenta que la variación temporal de la presión atmosférica, como regla, no causa el efecto de movimiento del aire, sino la dinámica siempre se debe al gradiente espacial de la presión, está claro, que al tema de oscilaciones diarias de la presión atmosférica no se le presta mucha atención en los estudios del tiempo meteorológico.

Los períodos señalados arriba coinciden con ciertas armónicas forzadas en la Tierra; por lo tanto, en el presente artículo se discute precisamente el fenómeno de la marea atmosférica. Si la marea en el océano es de carácter gravitacional, la marea atmosférica es influenciada por la radiación solar y la gravitación lunar [2].

Las observaciones de la variabilidad diaria de la presión atmosférica en la estación meteorológica automática del CIOH presentan oscilaciones en un promedio de 4 hPa de rango. Considerando, que la marea atmosférica también forma las anfidromías en interacción con las mareas oceánicas [2], en el trópico, donde la amplitud de la marea atmosférica es máxima, se encuentra una influencia notable de los fenómenos meteorológicos sobre el comportamiento diario de la presión, causado por la marea, y puede existir una correlación entre los eventos meteorológicos, manifestados en la intensidad y el momento de precipitación convectiva y la fase de la marea en la atmósfera.

En el presente trabajo se exponen algunas referencias sobre el tema de la marea atmosférica, recopilando la información que indica su naturaleza como fenómeno meteorológico. Luego, se discute la información obtenida de la estación del CIOH con respecto al problema de una posible influencia del fenómeno en el estado del tiempo en la región.

### Física del fenómeno

En [3] se da una amplia descripción de la marea atmosférica. Existen dos tipos de la marea en la atmósfera: la marea de radiación solar y la marea gravitacional. La primera está causada por la adsorción de la energía solar por ozono en la estratosfera y mesosfera, igual como por el vapor del agua en la troposfera y la transformación de fase del agua. La segunda tiene la naturaleza astronómica, semejante a las mareas en el océano y en la tierra sólida. Según el trabajo citado, para la marea de radiación solar se presenta una disminución de su amplitud en la zona tropical en dirección desde el ecuador hacia los polos; también se manifiesta un sistema de cuatro anfidromías en el sentido contrario del giro en los dos hemisferios debido a la rotación de la Tierra.

Al contrario, para la marea gravitacional, existe una asimetría bien definida entre los hemisferios, lo que es causado por la distribución no uniforme de las áreas de los continentes en el planeta. La marea gravitacional en la atmósfera es mucho menor (20 veces) en comparación con la de radiación solar. El máximo de la última ocurre aproximadamente dos horas antes de la culminación del Sol.

Para entender la física de la marea atmosférica, se presenta su descripción matemática, según el trabajo [2], donde se encuentran las ecuaciones de la dinámica de la marea atmosférica en ciertas aproximaciones tradicionales y sin fuentes/sumideros de energía:

$$\partial \vec{v} / \partial t + \ell \vec{k} \times \vec{v} = -\vec{\nabla} p / \rho_0 \quad , \quad (1)$$

$$\partial w / \partial t = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g \frac{\rho}{\rho_0} \quad , \quad (2)$$

$$\partial \rho / \partial t = -\rho_0 \chi - \frac{d\rho_0}{dz} w \quad , \quad (3)$$

$$\partial p / \partial t = -c^2 \rho_0 \chi + g \rho_0 w \quad , \quad (4)$$

donde  $\chi = \nabla \cdot \vec{u}$  es la divergencia del campo  $\vec{u} = (u, v, w)$  con las tres componentes de velocidad de viento en los sentidos de la longitud, latitud y vertical  $z$ , respectivamente;  $P$  y  $\rho$  son las perturbaciones de la presión atmosférica y de la densidad del aire;  $c = (\gamma P_0 / \rho_0)^{1/2}$  es la velocidad adiabática del sonido;  $\gamma$  es una constante;  $P_0$  y  $\rho_0$  son la presión y densidad no perturbadas, interrelacionadas mediante la ecuación de estado  $p_0 = \rho_0 R T$ ;  $T_0 = T_0(z)$  es el patrón de la temperatura del aire en el estado de reposo;  $\ell$  es el parámetro de Coriolis;  $g$  es la gravedad;  $t$  es el tiempo.

El sistema (1)-(4) fue solucionado numéricamente en [2], teniendo en cuenta la topografía real de la Tierra con una resolución de 5°. Se buscó el espectro de las oscilaciones propias en la atmósfera. El espectro indica que alrededor de los períodos semi-diurnos forzados (12.0 y 12.42 horas) se encuentran varias armónicas propias de la atmósfera, una de las cuales (más cercana) tiene el período de 11.12 horas, mientras que en la vecindad del período forzado diurno (24.0 horas) no se observan picos correspondientes a las oscilaciones propias. De acuerdo con este análisis, en [2] entonces, se hace una suposición de que existe una gran posibilidad de amplificación de resonancia de la marea semi-diurna, lo que no tiene lugar para la armónica diurna. Esto explica la presencia de dos picos diarios en el comportamiento de la presión atmosférica, lo que está ilustrado en el siguiente apartado.

Adicionalmente, en [2] se hace una recopilación de los experimentos numéricos, realizados en [4]. Básicamente, se realizó la modelación de la marea atmosférica semi-diurna (onda  $M_2$ ) sin y con interacción con la marea oceánica y con la influencia de la topografía terrestre. Resulta destacado el hecho de que sin dicha influencia, la marea atmosférica sería una onda progresiva zonal del este, con la tendencia de disminución de su amplitud desde el Ecuador hacia los polos.

En la realidad, la interacción con la marea oceánica hace formar varios puntos anfidrómicos en la atmósfera terrestre: uno de los centros con el giro contra las manecillas del reloj se encuentra ubicado en la costa Atlántica de América del Norte en una latitud aproximada de 40°N; otra anfidromía está ubicada en la parte central de la América Sur en latitud aproximada de 10°S. Este sistema gira en el sentido de las manecillas del reloj, de tal manera que sobre la región de Cartagena la onda se propaga del oeste. La topografía terrestre influye, pero no tan drásticamente como la marea oceánica; las líneas de isoamplitud muestran la presencia de los máximos (mayores de 1.5 hPa) en la banda ecuatorial en los meridianos 100°W y 20°W, entre otros. Esta circunstancia implica que la onda de la marea  $M_2$  (la más significativa energéticamente), que se propaga sobre la región de interés del presente estudio, disminuye su amplitud en el sentido oeste-este.

Ahora bien, si las ondas del este, asociadas en la región con los eventos de precipitación y mal tiempo, se propagan en el sentido contrario, debe existir una modulación de la oscilación de campo de la presión atmosférica. Una onda del este es una depresión con una escala espacial, supuestamente, mucho menor que los 80° de longitud geográfica (la distancia mencionada entre los centros de la amplitud máxima de la marea), pero su velocidad de fase también es mucho menor que la velocidad de onda de la marea atmosférica. Así, puede existir una influencia de la última en el estado del tiempo.

## *Materiales y métodos*

En el presente estudio se analizaron los datos de la estación automática del CIOH en Cartagena de Indias, ubicada en la Isla Manzanillo en las coordenadas 10°12'27" N y 75°32'02" W. La estación registraba los datos de la presión atmosférica, temperatura y humedad del aire, punto de rocío y el viento. De todos estos parámetros en este trabajo sólo se analizó la presión atmosférica. El registro de la estación era de cada minuto con un promedio de 10 min del tiempo.

El período de análisis corresponde a la disponibilidad de datos de la estación automática: entre el mes de julio de 2007 y julio de 2008. Simultáneamente con esta información, se utilizaron los datos del pluviómetro, localizado en la misma área.

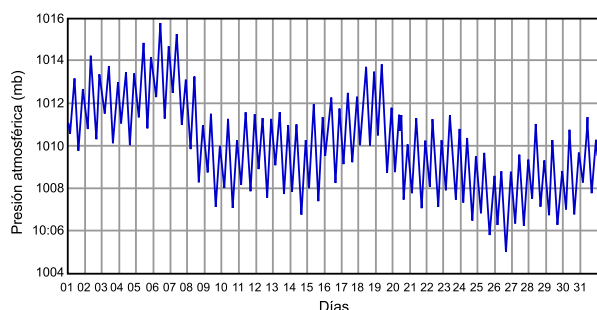
Se efectuó un análisis gráfico de la información mencionada, enfocado en el comportamiento temporal de la presión atmosférica, la reflexión en este comportamiento de las fases de la marea atmosférica y su correlación con los eventos de lluvia en la estación.

Cuando se encontraron anomalías en las series de tiempo de la presión, se involucraron mapas sinóticos del Centro de Predicción Tropical, Florida,

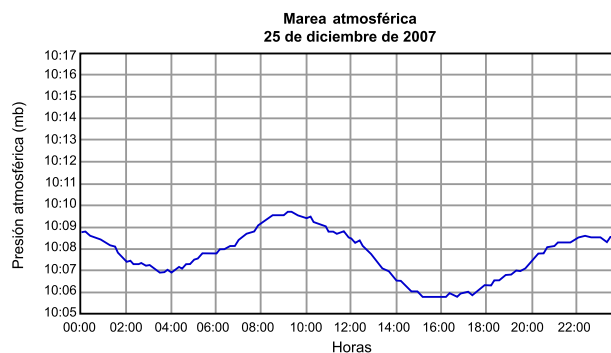
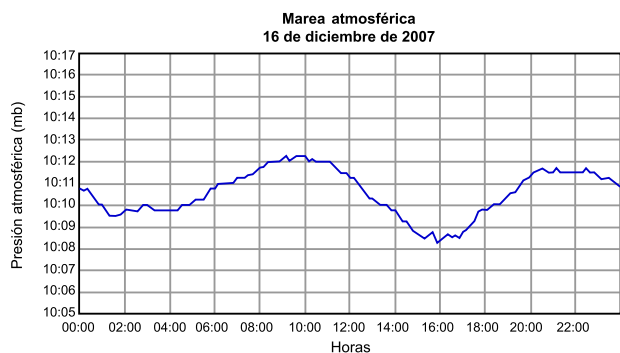
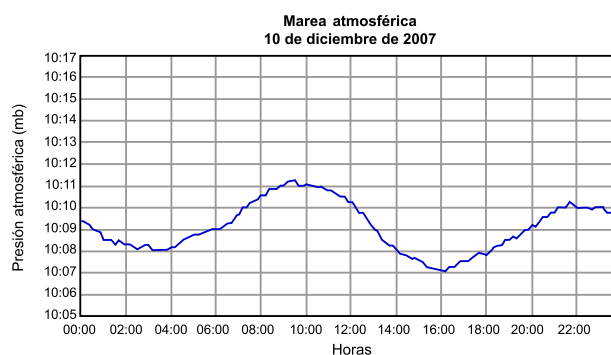
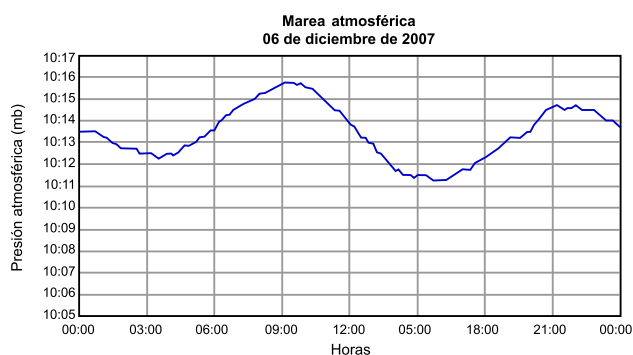
para analizar el campo bórico y procesos atmosféricos sobre la región.

## Resultados

Como se mencionó, el carácter predominante de la marea semidiurna en la atmósfera, hace que el comportamiento diario (ver por ejemplo, la figura 2) tenga siempre dos máximos y dos mínimos diarios, independiente de las variaciones de la presión, relacionadas con la situación sinótica sobre la región, como se puede inferir de la figura 1, la cual representa parte del período seco del año, mostrando las variaciones de la presión atmosférica correspondientes a las oscilaciones de los sistemas bóricos, pero independientemente del estado del tiempo durante la época seca y la tendencia de la presión. En la figura 2 se observa cómo la marea atmosférica conserva su comportamiento: siempre hay una cierta diferencia entre los dos picos diarios debido a la componente diurna de radiación para las horas de la mañana (entre las 9 a.m. y 10 a.m.). El mínimo en horas de la tarde (entre las 3 y 4 p.m.) en la época seca siempre es más profundo en comparación con el otro mínimo entre las horas 3 y 4 a.m.



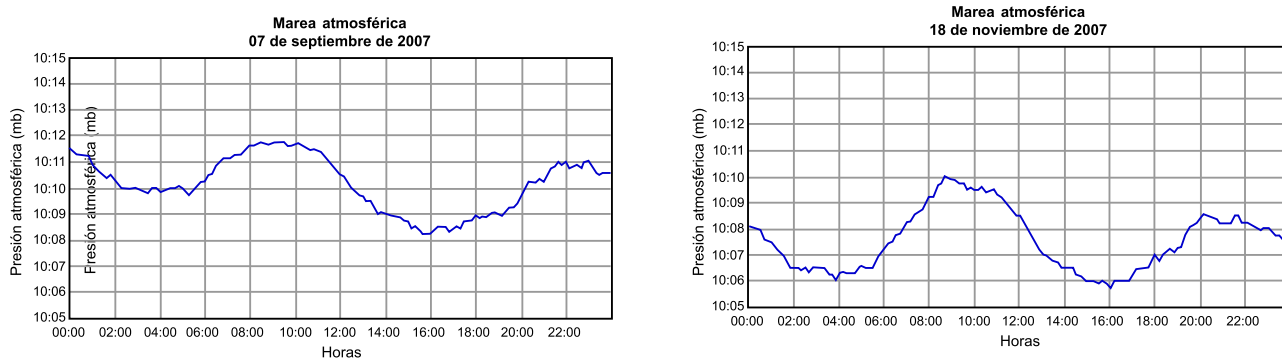
**Figura 1.** Variación de la presión atmosférica para el mes de diciembre de 2007 en la estación automática del CIOH.



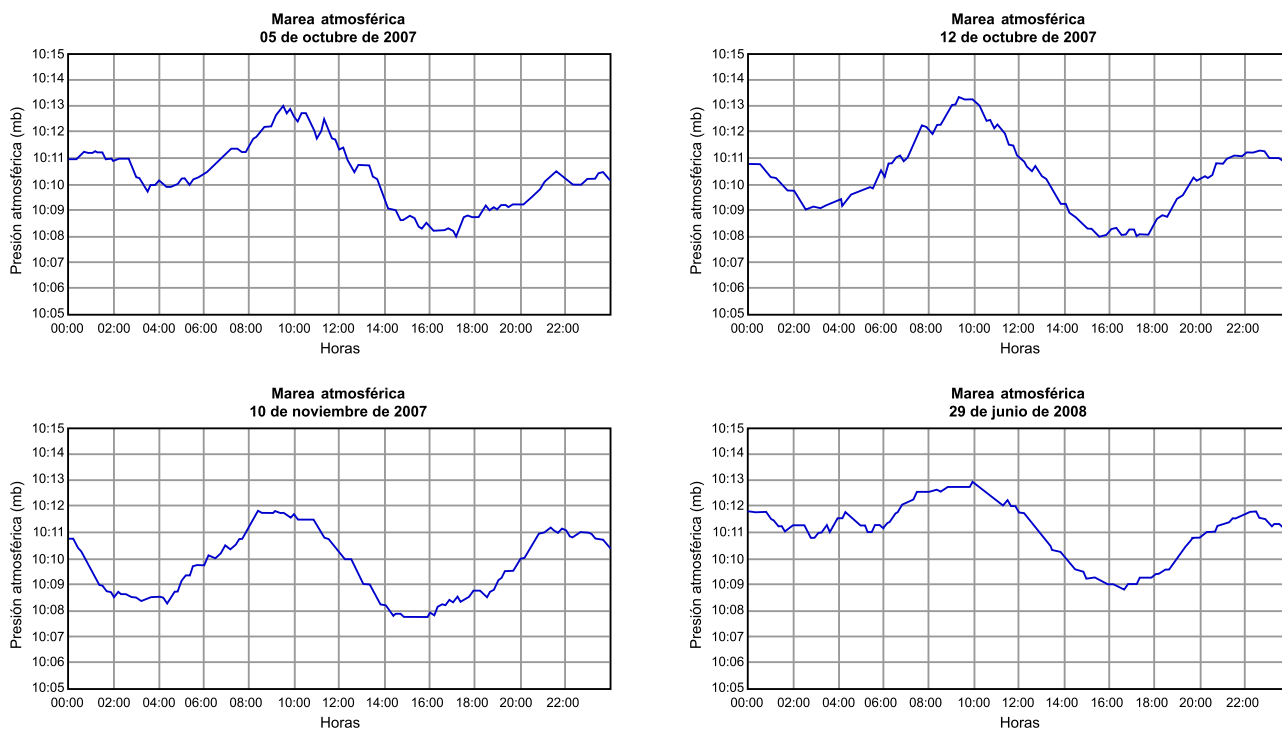
**Figura 2.** Variación de la presión atmosférica (en hPa) para los días 6, 10, 16 y 25 de diciembre de 2007. Período seco del año.

Durante el período húmedo del año, fueron analizados 81 casos con la precipitación (agosto-noviembre de 2007 y mayo-julio de 2008, períodos durante los cuales se obtuvieron los datos de la estación automática con las mediciones simultáneas de la presión atmosférica). La figura 3 muestra que para el

período húmedo del año, durante los días sin lluvia el comportamiento es idéntico al mostrado en la figura 2. Resulta que para los casos cuando la precipitación ocurre en las horas de la mañana, también se observa la misma forma de la oscilación diaria de la presión atmosférica (ver figura 4).



**Figura 3.** Variación de la presión atmosférica (en hPa) para los días 7 de septiembre y 18 de noviembre de 2007. Época húmeda del año; días sin precipitación.



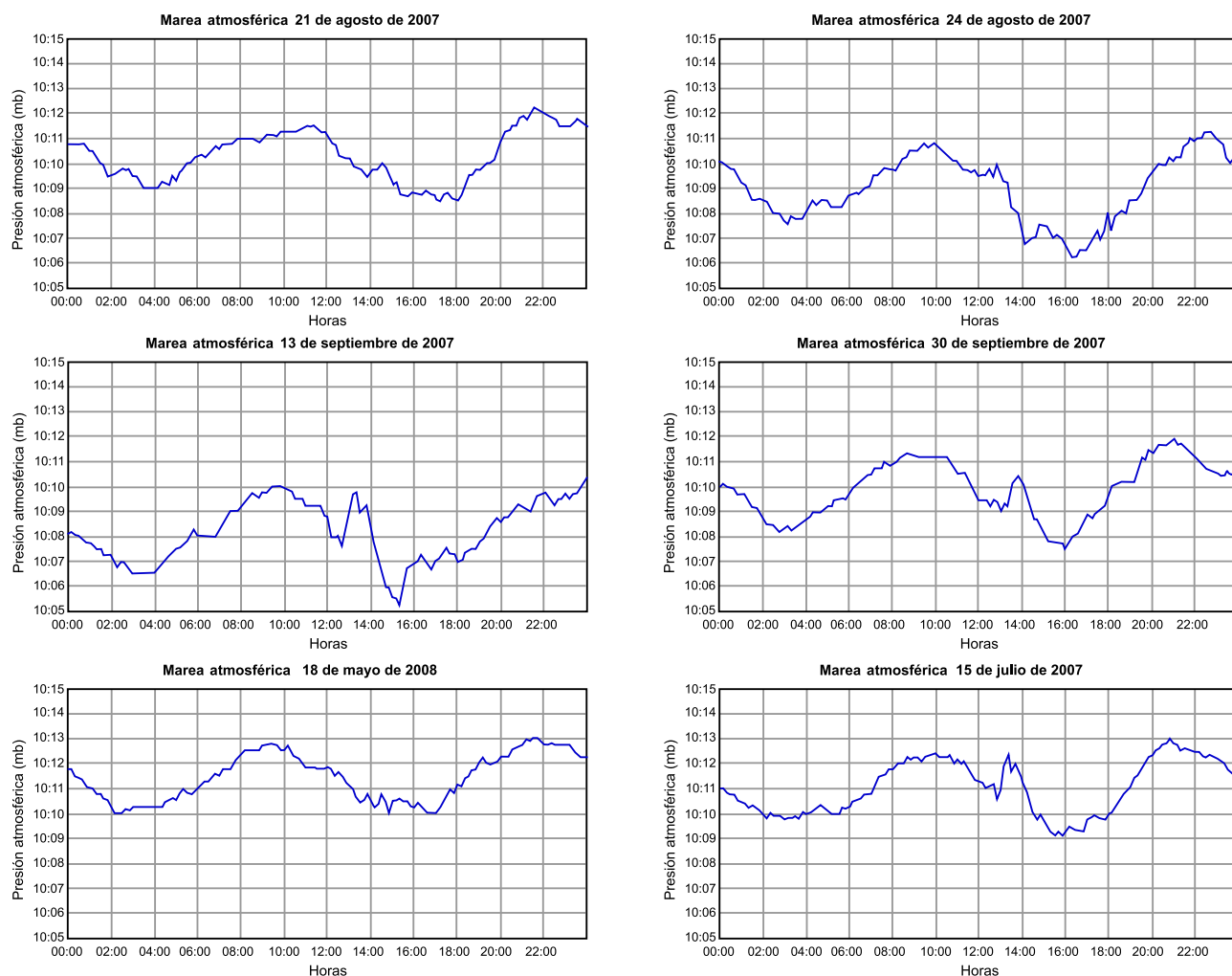
**Figura 4.** Variación de la presión atmosférica (en hPa) para los días 5 y 12 de octubre, 10 de noviembre de 2007 y 29 de junio de 2008 con las lluvias en las horas de la mañana (ver tabla 1).

**Tabla 1.** Eventos de precipitación para los días analizados en las figuras 4 y 5.

Fecha	Hora	Cantidad (mm)
05/10/2007	10 - 11	1.40
12/10/2007	05 - 07	12.30
10/11/2007	04 - 07	3.50
29/06/2008	01 - 07	3.50
21/08/2007	12 - 14	1.70
24/08/2007	13 - 15	15.00
13/09/2007	12 - 15	43.20
30/09/2007	13 - 15	8.00
19/05/2008	13 - 16	6.20
15/07/2008	13 - 14	23.70
17/08/2007	13 - 19	33.00

Es interesante analizar el comportamiento de la presión atmosférica durante los eventos de precipitación en horas de la tarde. La figura 5 muestra que: 1) aparece un tercer máximo de la presión durante la lluvia, 2) la amplitud de este máximo es proporcional a la cantidad de la precipitación (tabla 1) y 3) el segundo máximo diario en horas de la noche es mayor en comparación con el máximo diurno.

También, se observó la influencia del paso de ondas del este en el comportamiento diario de la presión. La figura 6, correspondiente a los días 17 de agosto de 2007 y 09 de junio de 2008, ilustra ejemplos del paso de una onda del este en horas de la mañana (mapas sinópticos del TPC, Miami, hora 12:00 UTC) y la



**Figura 5.** Variación de la presión atmosférica (en hPa) para los días 21 y 24 de agosto, 13 y 30 de septiembre de 2007 y 19 de mayo y 15 de julio de 2008 con las lluvias en la tarde (ver tabla 1). Se observa que si llueve en la tarde el segundo máximo es igual o mayor que el primero, lo contrario a lo mostrado en las figuras 2 y 3.

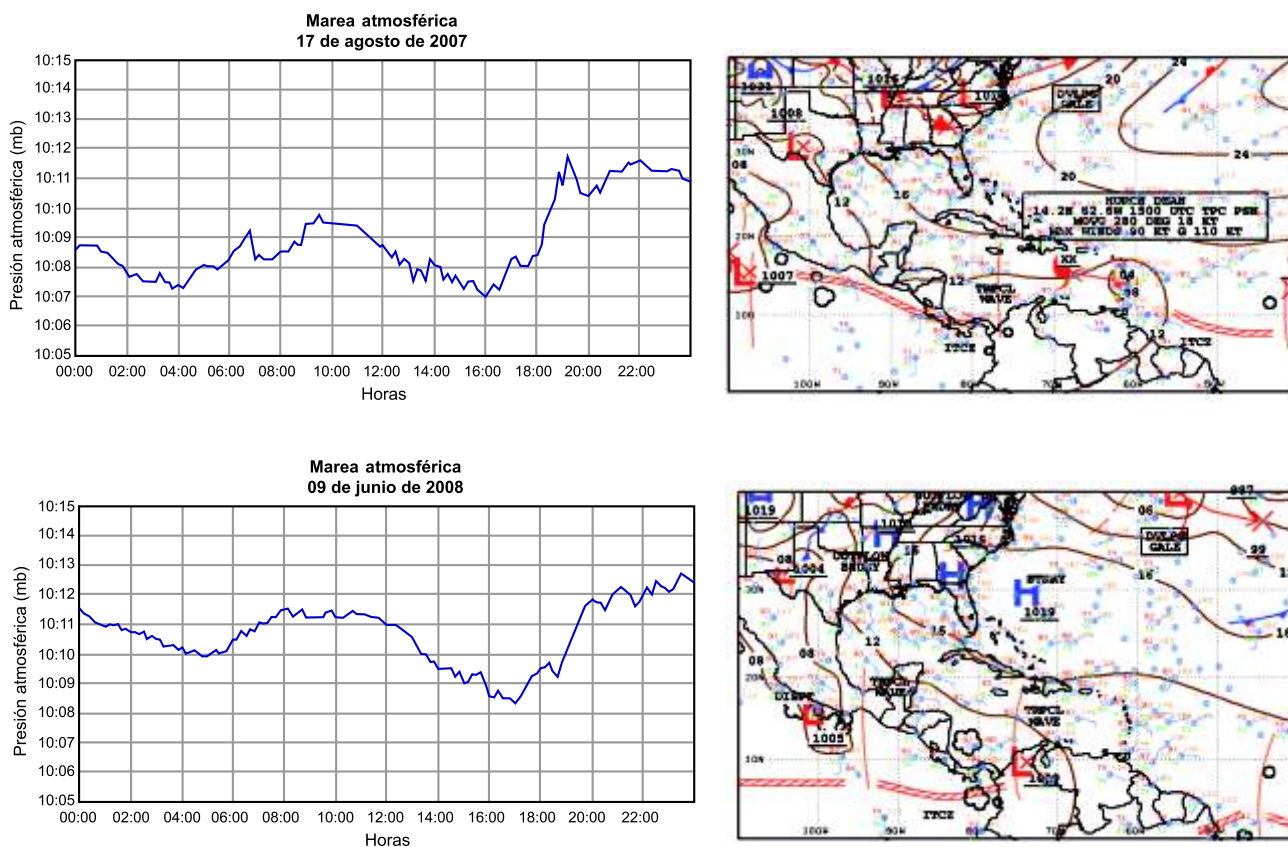
deformación del máximo diurno de la marea atmosférica. Sin embargo, igual como en los ejemplos de la figura 5, el caso del día 17 de agosto de 2007 muestra el fenómeno de precipitación en la estación, pero en las horas de la noche. La lluvia durante este día ocurrió después del paso de la onda y estaba relacionada con desarrollo convectivo por los efectos de la radiación solar.

## Discusión

Las observaciones del comportamiento diario de la presión atmosférica en la estación meteorológica del CIOH muestran los ciclos de la marea con un rango de

oscilación del orden de 4 hPa, lo que corresponde a los resultados de la modelación presentados en [2]. También se señala el predominio de la marea semi-diurna sobre la diurna. El comportamiento de la marea indica un máximo mayor en horas de la mañana en comparación con el otro máximo semi-diurno siempre y cuando la situación sinóptica sobre la región corresponda a los fenómenos de lluvias en horas de la mañana, a los días de época húmeda sin precipitación o a la época seca del año.

Otros casos, relacionados con las lluvias en horas de la tarde cambian este comportamiento de manera sustancial. El paso de las ondas del este pueden causar



**Figura 6.** Variación de la presión atmosférica (izquierda, en hPa) durante el paso de ondas del este (Centro de Predicción Tropical, FL, derecha) para los días 17 de agosto de 2007 (arriba) y el 09 de junio de 2008 (abajo).

o no la precipitación, lo que puede coincidir con la fase de la marea, teniendo en cuenta que la marea atmosférica de mayor influencia ( $M_2$ ) tiene un giro anfidrómico en la región del Caribe en el sentido contrario a la propagación de la onda del este, disminuyendo su amplitud durante este giro. Lo último debe causar una inclinación ligera (gradiente) del campo de la presión atmosférica, sobre la cual actúan los procesos de mayor período, tales como la evolución de las ondas ecuatoriales.

Es importante mencionar que los detalles de oscilaciones en la presión atmosférica durante las lluvias convectivas de corta duración, se observaron los registros automáticos de 10 minutos de discretización en el tiempo y no son apreciables con los registros horarios.

### *Agradecimientos*

---

El trabajo fue financiado por la Dirección General Marítima dentro del proyecto SPOA, año 2008; contrato No. 0038-GINRED4-2008 celebrado entre DIMAR y OCEANMET LTDA. Los autores expresan sus agradecimientos al personal de la Central de Pronósticos del CIOH por su colaboración y al evaluador anónimo por sus sugerencias en el texto.

### *Referencias bibliográficas*

---

- [1] Matveev LT. (1984). The Course of General Meteorology (Physics of Atmosphere). Leningrad, Gidrometeoizdat, 752 p.
- [2] Marchuk GI & Kagán BA. (1991). Dynamics of Ocean Tides, Leningrad, Gidrometeoizdat, 472 p.
- [3] Chapman S & Lindzen R. (1970). Atmospheric Tides. Reidel Publ. Comp., Holland, 179 p.
- [4] Kagán BA & Shkutova NB. (1985). Sobre la influencia de las mareas oceánicas en las mareas gravitacionales en la atmósfera. Oceanología, Vol. 25, No. 2, pp. 193-200. (en ruso).