

VARIACIÓN ESTACIONAL DEL NIVEL DEL MAR EN EL GOLFO DE MÉXICO Y MAR CARIBE

J.I., González, J. Ochoa y P. Ripa

INTRODUCCIÓN

Se utiliza un conjunto de series de tiempo de promedios mensuales del nivel del mar medido en estaciones mareográficas del Golfo de México y Mar Caribe. Esta base de datos comprende 80 estaciones con un total de 1650 años y proviene principalmente del Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC), Instituto Hidrográfico de Cuba (IHC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Esta base de datos comprende 80 estaciones con un total de 1650 años y proviene principalmente del Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC), Instituto Hidrográfico de Cuba (IHC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y Scripps Institution of Oceanography (SCRIPPS). con el objeto de resaltar algunos aspectos interesantes de la tendencia, ciclos anual y semianual, así como la anomalía de marea. Las estaciones se encuentran distribuidas principalmente en las costas (80%) y en islas del Mar Caribe (20%), dejando un notorio vacío en la parte central de ambos mares y hacia las costas de Nicaragua y Belice (Figura 1). Las costas del norte del Golfo de México tienen una alta densidad de estaciones y las series de tiempo más largas. Hacia las costas mexicanas del Golfo de México y en general en el Mar Caribe, las estaciones son más escasas, pero se cuenta con un buen número de series largas. La mayor parte de las series utilizadas tienen un control de su referencia local (marcadas como Revised Local Reference RLR por el PSMSL) (Spencer y Woodworth, 1996), sin embargo los datos de algunas estaciones fueron trabajados "crudos" (clasificados como METRIC por el PSMSL). A las estaciones en esta situación se les anota un asterisco en la Tabla 1 y los datos deben ser tomados con precaución.

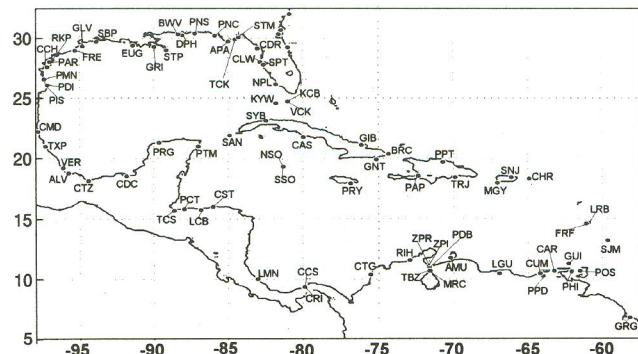


Figura 1. Estaciones Mareográficas en el Golfo de México y Mar Caribe

Tabla 1. Tendencia, Amplitud y Fase de las Componentes Anual y Semianual en el Golfo de México y Mar Caribe

Clave	Tendencia mm/año	Amplitud Anual mm	Día Máximo días	Amplitud Semianual mm	Día 2 Máximo días	Meses
mgv	1.5 ± 0.1	60 ± 2	25 Sep ± 2	14 ± 2	10 Oct ± 4	455
sso	2.3 ± 0.8	74 ± 6	16 Ago ± 5	22 ± 6	06 Ago ± 8	211
gnt*	1.7 ± 0.2	58 ± 3	18 Sep ± 3	22 ± 3	11 Oct ± 4	343
san*	0.8 ± 0.5	65 ± 4	04 Sep ± 4	19 ± 4	16 Oct ± 7	254
pry	0.7 ± 0.9	59 ± 6	16 Ago ± 6	25 ± 6	18 Ago ± 7	189
pap	10.7 ± 0.8	52 ± 4	10 Sep ± 4	17 ± 4	17 Oct ± 7	152
car*	-2.3 ± 0.4	58 ± 4	6 Oct ± 4	33 ± 4	23 Oct ± 3	254
lgu*	2.3 ± 0.2	62 ± 3	3 Oct ± 3	46 ± 3	25 Oct ± 2	432
amu*	0.2 ± 0.3	83 ± 4	28 Sep ± 2	59 ± 4	24 Oct ± 2	370
mrc*	3.8 ± 0.4	44 ± 4	14 Sep ± 5	43 ± 4	17 Nov ± 3	274
rih	2.8 ± 0.9	79 ± 7	12 Sep ± 5	56 ± 7	27 Oct ± 3	194
ctg	5.3 ± 0.1	53 ± 2	18 Sep ± 3	28 ± 2	21 Oct ± 3	504
cri*	1.4 ± 0.1	29 ± 2	25 Oct ± 3	9 ± 2	11 Nov ± 5	860
pct	8.9 ± 0.3	68 ± 3	17 Sep ± 2	29 ± 3	10 Oct ± 3	252
prg	2.1 ± 0.3	75 ± 5	6 Nov ± 5	50 ± 5	21 Oct ± 3	390
cdc	2.2 ± 0.8	88 ± 6	7 Nov ± 4	56 ± 6	21 Oct ± 3	190
ctz	2.6 ± 0.3	155 ± 5	12 Oct ± 2	53 ± 5	06 Oct ± 3	335
alv	1.1 ± 0.7	111 ± 7	2 Oct ± 4	50 ± 7	02 Oct ± 4	265
ver	1.6 ± 0.2	68 ± 4	16 Oct ± 3	53 ± 4	14 Oct ± 2	456
txp	2.7 ± 0.4	77 ± 5	6 Oct ± 4	52 ± 5	13 Oct ± 3	286
cmd	7.7 ± 1.0	112 ± 7	1 Oct ± 4	67 ± 7	14 Oct ± 3	214
pis	2.9 ± 0.2	57 ± 4	7 Oct ± 4	70 ± 4	20 Oct ± 2	576
rkp*	3.9 ± 0.3	62 ± 5	23 Ago ± 5	80 ± 5	24 Oct ± 2	444
fre	11.8 ± 0.3	67 ± 6	3 Sep ± 5	76 ± 6	21 Oct ± 2	485
glv	6.4 ± 0.1	69 ± 4	22 Ago ± 3	74 ± 4	20 Oct ± 1	1010
eug	9.7 ± 0.3	80 ± 5	29 Jul ± 3	57 ± 5	15 Oct ± 2	398
gri	10.1 ± 0.2	76 ± 4	21 Ago ± 3	50 ± 4	14 Oct ± 2	544
stp	37.8 ± 1.5	62 ± 8	16 Sep ± 7	56 ± 8	18 Oct ± 4	122
pns	2.2 ± 0.1	89 ± 3	18 Ago ± 2	40 ± 3	12 Oct ± 2	836
apa	1.4 ± 0.5	74 ± 5	10 Ago ± 4	33 ± 5	05 Oct ± 4	302
cdt	1.5 ± 0.1	103 ± 3	11 Ago ± 2	23 ± 3	14 Oct ± 4	662
spt	2.4 ± 0.1	87 ± 3	21 Ago ± 2	21 ± 3	17 Oct ± 4	576
npl	1.4 ± 0.3	80 ± 4	3 Sep ± 3	27 ± 4	21 Oct ± 4	345
kyw	2.3 ± 0.1	79 ± 2	25 Sep ± 2	38 ± 2	22 Oct ± 2	975

El ciclo anual observado en los datos es una de las contribuciones más notables a su variabilidad temporal en frecuencias bajas. El trabajo de Tsimplis y Woodworth (1994) hace notar la distribución espacial de la amplitud y fase en un conjunto de estaciones mareográficas en las costas de todos los océanos. En el Hemisferio Norte una amplitud típica de esta componente es de 7 cm y la ocurrencia del máximo en septiembre; sin embargo, su distribución espacial y temporal no es sencilla. En general para tales series su variabilidad es producida o relacionada a: forzamiento global atmosférico, cambios en el nivel de los continentes (Aubrey, 1990), proximidad de las estaciones a grandes ríos, el encontrarse dentro de cuencas semicerradas (Godin, 1991) y, en menor proporción, a la gravitación (Lisitzin, 1974). Se puede extraer una información física muy importante de estos datos; ver por ejemplo (Ripa, 1997) para la dinámica y termodinámica del Golfo de California.

ANOMALÍA DE MAREA EN EL GOLFO DE MÉXICO Y MAR CARIBE

La Figura 2 muestra en su lado derecho, después de las siglas identificadoras de cada estación, las componentes senosoidales de período anual y semianual ajustadas a cada serie

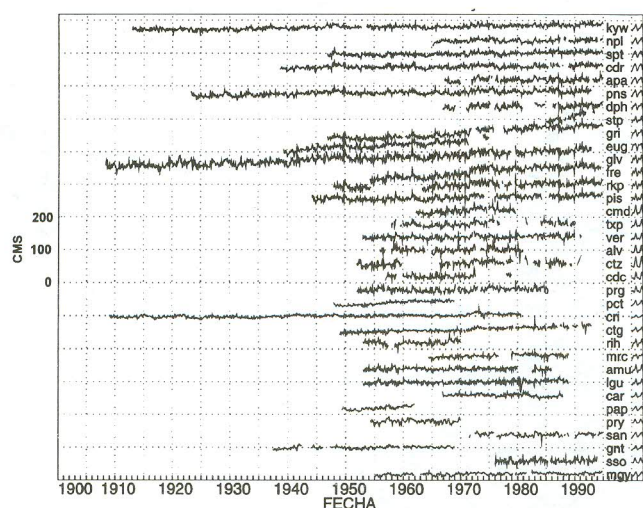


Figura 2. Anomalia Mensual de Marea en el Golfo de México y Mar Caribe

de promedios mensuales del nivel del mar. Estos ajustes se grafican por un intervalo de dos años. El lado izquierdo muestra la anomalía, definida al sustraer tales componentes de cada serie.

La Tabla 1 presenta para cada estación su localización, el ajuste por cuadrados mínimos de la pendiente en las series de anomalías, la desviación estándar asociada a tal pendiente, y la amplitud y fecha del máximo de la componente anual. Del total de 80 estaciones en la región, la Figura 2, Tabla 1 y Figura 5 solo muestran 35 (las más representativas). La información completa puede ser requerida por correo electrónico a ignaci@cicese.mx.

Las tendencias, en general ascendentes (considerando solo estaciones con más de 30 años de datos), de todas las series de anomalías son mayores hacia la parte noroeste del Golfo de México. Las estaciones próximas al delta del Mississippi, desde Rock Port (RCK), hasta Dauphin Island (DPH) muestran un claro hundimiento en relación a las estaciones vecinas, con un máximo en South Pass (STP). Esta zona ha sido identificada con anterioridad como una zona de subsidencia costera (Aubrey, 1990). Si consideramos las estaciones de Key West (KYW), Pensacola (PNS), Cedar (CDR), Veracruz (VER) y St. Petersburg (SPT) como "referencias" (en promedio con tendencias positivas de ≈ 2 mm/año), encontramos un hundimiento relativo promedio de ≈ 8 mm/año en el área del delta del Mississippi.

También encontramos períodos de 3 a 4 años con tendencia descendente en varias estaciones, por ejemplo de 1929 a 1932 en Galveston (GLV), Pensacola (PNS) y Key West (KYW), de 1962 a 1964 en estaciones dentro del Golfo de México. En septiembre de 1961 hay un levantamiento importante presente en todas las estaciones del Golfo, principalmente en las costas noreste y norte con un máximo de 35 cm en Galveston (GLV).

Un evento interesante que parece propagarse desde el extremo sur de La Florida hasta Texas se observa en 1987. La

señal se pierde en las costas de México y no vuelve a aparecerse en el resto de las estaciones.

En el Mar Caribe existe igualmente una tendencia generalizada de +2 mm/año. Encontramos un aumento exagerado en Cartagena (CTG) de +5 mm/año, debido probablemente a un hundimiento local. Las componentes ajustadas y variabilidad son pequeñas en relación a las estaciones en el interior del Golfo de México. La excepción son las islas Cayman (SSO y NSO) que muestran una variabilidad sobresaliente en relación al resto del Mar Caribe. Se aprecia visualmente una alta correlación de ciertos eventos, es decir anomalías de similar amplitud que coinciden en tiempo para un número grande de estaciones; sin embargo, no observamos una correlación evidente con los eventos de "El Niño" como en el Pacífico (González, Ochoa y Ripa, 1996).

VARIACIÓN ANUAL Y SEMIANUAL

Con la finalidad de detectar la propagación de ambos constituyentes entre las estaciones costeras y diferenciarla de su comportamiento con las estaciones alejadas de la costa, en las Figuras 3 y 4 se presentan gráficos de la amplitud y fase a lo largo de la costa con todas las estaciones disponibles para los dos componentes. Los datos de las estaciones costeras están unidas con una línea, en tanto que las islas se presentan de forma independiente, mediante un círculo abierto. La estación de referencia es Georgetown (GRG), en la costa de la Guyana, al sur del Mar Caribe (Figura 1). La distancia a lo largo de la costa asignada para las islas es la correspondiente con el punto más cercano al continente. También se dibuja con una barra la incertidumbre o error en la determinación de cada parámetro.

Componente Anual

En términos generales la componente anual es mayor en el Golfo de México (en promedio 75 mm) que en el Mar Caribe (en promedio 65 mm) (Figura 3). Se amplifica hacia Coatzacoalcas (CTZ), Ciudad Madero (CMD) y hacia la parte occidental de la península de Florida y muestra un ligero aumento hacia el delta del Mississippi y en las costas de Yucatán. Las estaciones de Port Isabel (PIS) y Padre Island (PDI), ambas en el interior de lagunas costeras, muestran un mínimo en la amplitud. En el Mar Caribe se observa una disminución gradual hacia las costas de Centroamérica y se recupera en las costas de Sudamérica con una amplificación importante en las islas Barbados.

En el Golfo de México y Mar Caribe los meses del día máximo de la señal anual ocurren en promedio en septiembre. El primer máximo sucede en las proximidades del Mississippi en julio y agosto (EUG, GRI, DPH). Se observa un desfase de ≈ 1 mes hacia las estaciones de Florida (KYW y VCK), con máximo a finales de septiembre y otro retraso de ≈ 1 mes hacia las costas de Venezuela y Colombia (LGU, RIH y CTG). El signo de esta diferencia de fase coincide con el correspondiente a la propagación de una onda de Kelvin (Ripa, 1997). Sin embargo,

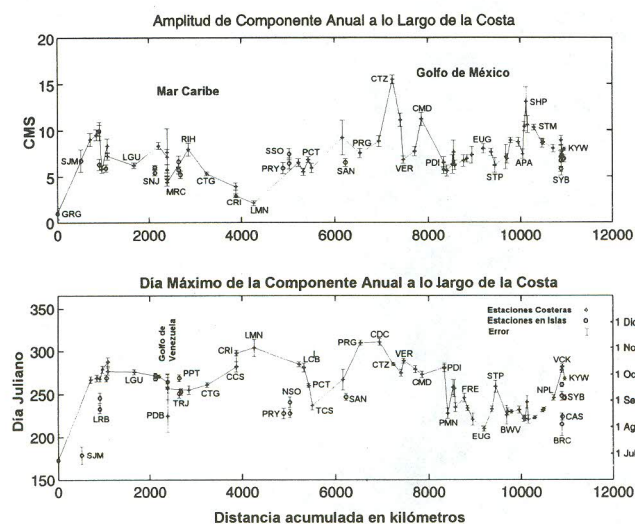


Figura 3. Amplitud y fase de la componente anual a lo largo de las costas del Golfo de México y Mar Caribe.

las variaciones locales son muy grandes, oscureciendo esta posible señal, como el adelanto importante en la estación STP, en las vecindades del delta del Río Mississippi, en el Golfo de Honduras (TCS y PCT), y el retraso en las costas de Yucatán (CDC y PRG).

Componente Semianual

La amplitud de la componente semianual es menor que la anual, mayor en el Golfo de México (≈ 50 mm) que en el Mar Caribe (≈ 30 mm) y con una amplificación importante hacia la parte noroccidental del Golfo de México, justo donde la amplitud anual se ve disminuida (Figura 4). La amplitud disminuye gradualmente hacia las estaciones que se encuentran más al oriente, hasta tener valores casi constantes de 20 mm en el Mar Caribe. Las estaciones próximas al Golfo de Venezuela muestran una amplificación de hasta 60 mm.

En promedio la fase de la semianual tiene la ocurrencia del segundo máximo anual a mediados de octubre en el Golfo de México. En el Mar Caribe sucede en promedio a finales de octubre, con un retraso importante en el Golfo de Venezuela. En el Golfo de México la distribución de fase a lo largo de la costa es más uniforme. No se detecta una propagación global.

Variabilidad temporal

Hicimos un ajuste para obtener amplitudes y fases anuales y semianuales para segmentos de 12 meses consecutivos en cada estación. Cada segmento se eligió desfasándolo 1 mes hacia adelante del segmento previo y se hizo la estimación para el dato del tiempo medio. Así se construyeron series con los parámetros anuales y semianuales variando en el tiempo. En la Figura 5 se muestran las series construidas de esta manera. Algunos puntos interesantes pueden destacarse a simple vista. En las series más largas, como son Key West (KYW), St Petersburg (STP), Cedar (CDR), Pensacola (PNS), Grand Isle (GRI), Eugene Island (EUG), Galveston (GLV), Freeport (FRE)

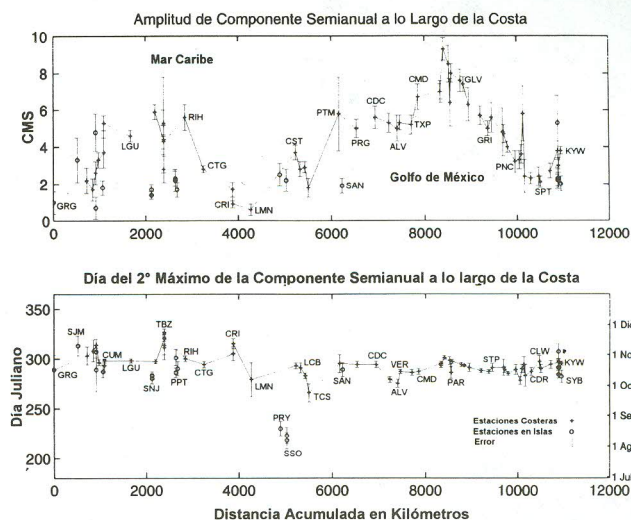


Figura 4. Amplitud y fase de la componente semianual a lo largo de las costas del Golfo de México y Mar Caribe

y Rock Port (RKP), se observa una modulación en la amplitud de la constituyente anual con períodos de varios años (alrededor de 8) con amplitudes altas y otros tantos con amplitudes bajas. Temporadas de amplitud mayor son entre 1940-1948, 1956-1964, 1975-1982 y 1989-1994. En las costas mexicanas del Golfo de México no es muy clara esta modulación. En las costas de Venezuela la modulación tiene una escala de tiempo del orden de 5 años observándose alta amplitud en los años de 1953-1957, 1962-1967 y 1970-1976.

A finales de 1969 se observa un levantamiento importante presente en todas las estaciones con un máximo en Alvarado (ALV) y Coatzacoalcas (CTZ). Es de destacar que los promedios mensuales en Alvarado durante 1969 registraron valores extremos que varían gradualmente de julio a noviembre, con un máximo en septiembre de 75 cm por arriba del promedio. Este comportamiento no se observó en las estaciones vecinas.

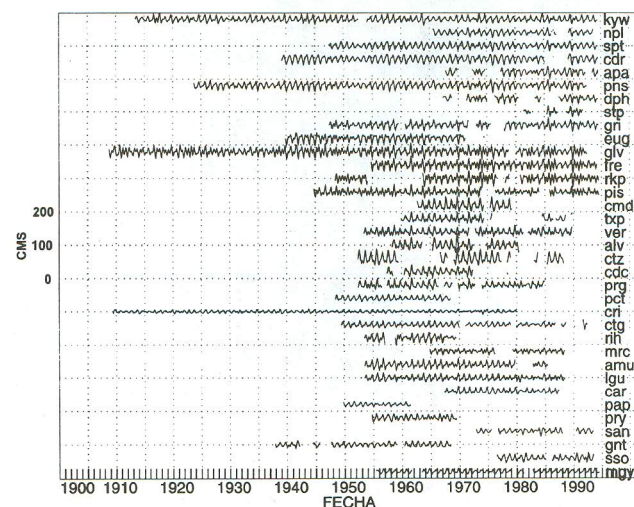


Figura 5. Suma de las Componentes Anual y Semianual en función del tiempo en el Golfo de México y Mar Caribe.

Durante los años de 1981 a 1983 se observa amplificación de las 2 componentes, observándose desde Key West (KYW) hasta Veracruz (VER). Este rasgo no es muy evidente en las estaciones del Caribe.

REFERENCIAS

- Aubrey, D.G., 1990, "Relative Sea Levels: Contributions from the Ocean and the Land" *en*: Towards an Integrated System for Measuring Long Term Changes in Sea Level. Report of a Workshop held at Woods Hole Oceanographic Institution. May 1990.
- Emery, L., and Aubrey, D.G., 1990, Sea levels, land levels and tide gauges. Springer-Verlag.
- Godin, G., 1991, Tides, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B.C., México.
- González, J.I., Ochoa, J., y Ripa, P., 1996, Series del Nivel del Mar. GEOS, Vol 16, No 1, p. 41-42
- Lisitzin, E., 1974, Sea Level Changes. Elsevier Oceanography Series Vol. 8.
- Ripa, P., 1997, Toward a Physical Explanation of the Seasonal Dynamics and Thermodynamics of the Gulf of California. Journal of Physical Oceanography, Vol. 27, p. 597-614.
- Spencer, N.E., and P.L. Woodworth, 1996, The Permanent Service for Mean Sea Level. Data Sets (June 1996). Permanent Service for Mean Sea Level. Bidston Observatory, Birkenhead, England.
- Tsimplis, M.N., and Woodworth, P.L., 1994, The global distribution of the seasonal sea level cycle calculated from coastal tide gauge data. Journal of Geophysical Research, Vol. 99, No. C8., p. 16,031-16,039. Ripa, P., 1997