

Tidal characteristics in a coral reef system from the western Gulf of Mexico

Características de la marea en un sistema arrecifal coralino del Golfo de México occidental

JJ Salas-Pérez^{1*}, D Salas-Monreal¹, VE Arenas-Fuentes¹, DA Salas-de-León², ML Riveron-Enzastiga²¹ Unidad de Investigación de Ecología y Pesquerías, Universidad Veracruzana, Hidalgo 617, Col. Río Jamapa 94290, Boca del Río, Veracruz, México. * E-mail: jsalasp39@yahoo.es² Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Apartado postal 70–305, 04510 México, DF.**Abstract**

This study shows the computed tidal harmonic results from a sea level time series performed to elucidate the temporal and spatial behavior of tides in the Veracruz Reef System (western Gulf of Mexico). Data from 11 pressure sensors moored from October to December 2004 revealed that the predominant harmonics within the coral reef system were the diurnal K_1 and O_1 components, followed by the semidiurnal M_2 component. The fortnightly constituent showed an amplitude comparable to that of the M_2 harmonic. Tidal amplitudes showed small differences throughout the area when compared with the phases. Phase lags among different stations were induced by bathymetric effects.

Key words: Bay of Campeche, Gulf of Mexico, tides, Veracruz Reef System.

Resumen

Este estudio muestra los resultados del análisis armónico de marea, calculados a partir de series de tiempo del nivel del mar, para elucidar el comportamiento espaciotemporal de la marea en el Sistema Arrecifal Veracruzano (occidente del Golfo de México). Se colocaron 11 sensores de presión de octubre a diciembre de 2004. De acuerdo a los datos obtenidos con estos sensores, los armónicos dominantes dentro del sistema arrecifal fueron las componentes diurnas K_1 y O_1 , seguidas por la componente semidiurna M_2 . El armónico quincenal mostró amplitudes comparables con las de M_2 . Las amplitudes de marea mostraron diferencias despreciables a lo largo del área de estudio, comparadas con las diferencias encontradas en las fases. Las diferencias en fase entre estaciones contiguas son inducidas por efectos batimétricos.

Palabras clave: Bahía de Campeche, Golfo de México, mareas, Sistema Arrecifal Veracruzano.

Introduction

Most tide-related studies in the Gulf of Mexico have aimed to understand tidal propagation from deep-sea to coastal regions through cotidal and corange maps generated from pressure sensors and numerical models (Grace 1932, Mofjeld and Wimbush 1977, Reid and Whitaker 1981, Salas-de León and Monreal-Gómez 1997, Kantha 2005). The diurnal tidal behavior within the gulf results from its diurnal tidal cooscillation with the Atlantic tidal oscillations. Therefore, the amplitudes and phases of diurnal tidal components in the western half of the gulf oscillate up and down almost in phase and do not propagate cyclonically around the basin as the semidiurnal tidal component does (Grace 1932, Reid and Whitaker 1981, Kantha 2005). Diurnal tidal components have a mode of oscillation estimated at 1.2 days (Reid and Whitaker 1981) and 1.5 days (Mofjeld and Wimbush 1977). In contrast, the semidiurnal M_2 tide in the gulf is generated by direct tidal potential forcing rather than water exchanges through the Yucatan Channel and the Strait of Florida (Reid and Whitaker 1981, Kantha 2005). As a result, the semidiurnal M_2 tide behaves as a

Introducción

La mayoría de los estudios relacionados con las mareas en el Golfo de México se han enfocado a entender la propagación de la marea desde el océano abierto hasta las regiones costeras por medio de mapas de amplitud y de fase. Esos mapas han sido generados a partir de sensores de presión y modelos numéricos (Grace 1932, Mofjeld y Wimbush 1977, Reid y Whitaker 1981, Salas-de León y Monreal-Gómez 1997, Kanwtha 2005). El comportamiento de la marea diurna dentro del golfo es debido a la cooscilación con la marea diurna del Atlántico. Por lo tanto las amplitudes y fases de las componentes de marea diurna en la mitad occidental del golfo oscilan hacia arriba y hacia abajo casi en fase, y no se propagan ciclónicamente alrededor de la cuenca como lo hace la componente de marea semidiurna (Grace 1932, Reid y Whitaker 1981, Kanwtha 2005). Las componentes diurnas de la marea tienen un modo de oscilación calculado en 1.2 días (Reid y Whitaker 1981) y 1.5 días (Mofjeld y Wimbush 1977). En cambio, la marea semidiurna M_2 en el golfo es generada directamente por el forzamiento del potencial de marea más que por los

Kelvin wave, propagating cyclonically around the gulf with an amphidromic point in the northwestern region of the Yucatan Peninsula (Reid and Whitaker 1981, Kantha 2005). Bathymetric variations along- and across-shore should diminish, trap or modify the tidal phase and amplitude as shown by Kagan and Kivman (1993) for other areas.

Some differences in semidiurnal tide patterns have been found on wide continental shelves, such as the Texas-Louisiana and the West Florida shelves (DiMarco and Reid 1998, He and Weisberg 2002). DiMarco and Reid (1998) reported that semidiurnal tide in the Texas-Louisiana shelf is not barotropic as a consequence of bottom friction and stratification. Along the West Florida shelf local geometry modifies tidal behavior, particularly the semidiurnal tidal components (He and Weisberg 2002).

In contrast with the extensive research on this topic conducted on the wide United States shelves through a combination of *in situ* measurements, and numerical and analytical models (DiMarco and Reid 1998, He and Weisberg 2002), little attention has been paid to the western and southern continental shelves of the Gulf of Mexico. Moreover, several coral reef communities and islands are found in areas scattered along the western and southern Mexican continental shelves of the Gulf of Mexico (Horta-Puga and Carriquiry 2008). The *in situ* measurements and numerical models of the Gulf of Mexico have usually neglected the islands and coral reef bathymetry (e.g., Grace 1932, Reid and Whitaker 1981, Salas-de León and Monreal-Gómez 1997, Kantha 2005), which may diminish, trap or modify tidal behavior (Huthnance 1985, Kagan and Kivman 1993). There are no previous related papers on the area surveyed. Hence, the objective of this study was to elucidate the temporal and spatial tidal features in a coral reef system.

Methodology

Study area

The main coral reef communities within the western Gulf of Mexico are located off Veracruz harbor and near the village of Anton Lizardo, and in conjunction with the local islands of coral origin they constitute the Veracruz Reef System (VRS) (fig. 1). The presence of reef communities and islands mainly oriented in a northwest-southeast direction (approximately parallel to the coastline), should induce tidal rectification owing to topographic changes. The two main coral reef communities in the area are located toward Veracruz harbor and near Anton Lizardo (fig. 1), and are separated by a small, sinuous bay. The Jamapa River, that discharges its waters in the middle part of the VRS, induces a strong seasonal dynamic interaction with the alongshore current systems (Salas-Pérez and Granados-Barba 2008). The depth within the area ranges from less than 5 m on the shoreward side of the reefs to about 40 m on the offshore side (fig. 1).

intercambios de agua a través del Canal de Yucatán y el Estrecho de Florida (Reid y Whitaker 1981, Kantha 2005).

La marea semidiurna M_2 se comporta como una onda de Kelvin, propagándose ciclónicamente alrededor del golfo con un punto amfidrómico en la región noroccidental de la Península de Yucatán (Reid y Whitaker 1981, Kantha 2005). Las variaciones batimétricas a lo largo y a lo ancho pueden disminuir, atrapar o modificar las fases y amplitudes de la marea como demuestran Kagan y Kivman (1993) para otras áreas.

Se han encontrado algunas diferencias en la distribución de la marea semidiurna sobre plataformas continentales anchas, tales como las plataformas de Texas-Luisiana y la Occidental de Florida (DiMarco y Reid 1998, He y Weisberg 2002). DiMarco y Reid (1998) enfatizan que la marea semidiurna en la plataforma de Texas-Luisiana no es barotrópica como una consecuencia de la fricción en el fondo y la estratificación. En la plataforma Occidental de Florida la geometría local modifica el comportamiento de la marea, particularmente a las componentes de marea semidiurna (He y Weisberg 2002).

En contraste con la extensa investigación sobre este tópico llevada a cabo por medio de la combinación de mediciones *in situ*, modelos numéricos y analíticos sobre las plataformas anchas de los Estados Unidos (DiMarco y Reid 1998, He y Weisberg 2002), se ha prestado poca atención a las plataformas continentales occidental y sur del Golfo de México. Por otra parte, existen varias comunidades coralinas arrecifales e islas en áreas dispersas a lo largo de las plataformas continentales mexicanas occidental y sur del Golfo de México (Horta-Puga y Carriquiry 2008). La combinación de mediciones *in situ* y modelos numéricos en el Golfo de México usualmente subestiman los efectos de las islas y la batimetría de los arrecifes coralinos (i.e., Grace 1932, Reid y Whitaker 1981, Salas-de León y Monreal-Gómez 1997, Kantha 2005), las cuales pueden amortiguar, mitigar o modificar el comportamiento de la marea (Huthnance 1985, Kagan y Kivman 1993), y no se han realizado trabajos previos en este sentido en el área de estudio. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo ha sido dilucidar las características temporales y espaciales de la marea en un sistema arrecifal coralino.

Metodología

Área de estudio

Las principales comunidades de arrecifes coralinos dentro del Golfo de México occidental están localizadas frente al puerto de Veracruz y cerca de la Villa de Antón Lizardo que, en conjunto con las islas locales de origen coralino, constituyen el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) (fig. 1). La presencia de estas comunidades arrecifales e islas, principalmente orientadas en dirección noroeste-sureste (aproximadamente paralelas a la línea de costa), puede inducir la rectificación de la marea

Data collection and processing

Eleven pressure sensors were deployed in the VRS from 1 to 30 November 2004 (fig. 1, table 1). The Star-Oddi pressure sensors used have an accuracy of 0.01 bars. The raw data in bars were converted to depth in meters (1 bar = 10.1979 m, $\rho = 1027 \text{ kg m}^{-3}$). Finally, the mean pressure at each sampling station was subtracted from its respective data series to obtain the variation in sea level height (SLH).

In addition, sea level time series (length of one month) from the Veracruz tidal gauge (VTG)—maintained by the National Autonomous University of Mexico (UNAM)—were used to validate the sea level variations registered with the pressure sensors. As the VTG is located inside Veracruz harbor (19°12' N, 96°08' W) it reports the lowest sea level variation within the study area. Time series 3 and 4 (fig. 2) registered anomalous jumps in SLH from 14 to 30 November 2004, so these data were not used in this study.

All SLH time series were filtered with the Godin-type filter $A_4^2A_5$ (applied for time series sampled at 15 min intervals) and $A_{12}^2A_{13}$ (applied for time series sampled at 5 min intervals) (Emery and Thomson 1997) in order to remove high frequencies. These frequencies can be considered as wind waves or noise for the purpose of this study. A spectral analysis was applied to all filtered sea level time series to obtain the main tidal frequencies in the area. Moreover, to obtain the amplitude and phases of all the main tidal harmonics, a classical harmonic analysis (Pawlowicz *et al.* 2002) was applied to each time series.

Results

Sea level height time series

The SLH time series presented a strong diurnal signal with a corresponding fortnightly modulation (fig. 3). The fortnightly

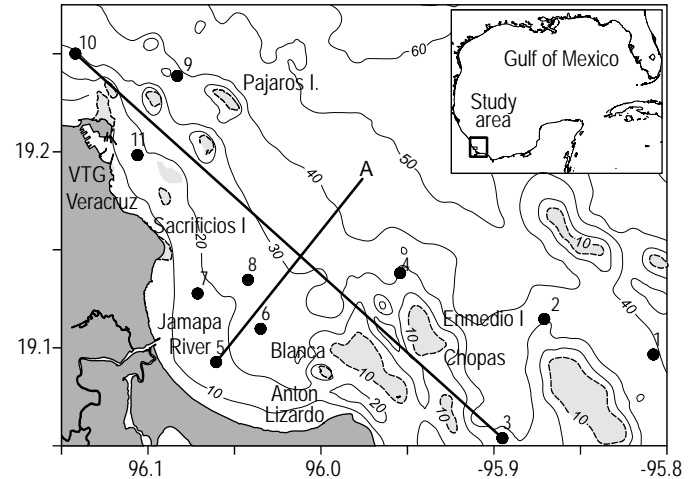


Figure 1. Map of the Veracruz Reef System, showing the location of the moorings deployed during the experiment (stations) and of the Veracruz tidal gauge (VTG). Bathymetric contours begin at 10 m of depth and then are shown at each 5 m.

Figura 1. Mapa del Sistema Arrecifal Veracruzano con la ubicación de los sensores (estaciones) durante el experimento y del mareógrafo de Veracruz (VTG). Las contornos batimétricos comienzan a 10 m de profundidad y posteriormente se indican cada 5 m.

debido a los cambios topográficos. Las dos principales comunidades de arrecifes coralinos dentro del área están localizadas hacia el puerto de Veracruz y cerca de la Villa de Antón Lizardo (fig. 1) y están separadas por una bahía pequeña de forma sinuosa. Además, el Río Jamapa, que desemboca a la altura de la parte media del Sistema Arrecifal Veracruzano, induce una fuerte interacción dinámica estacional con los sistemas de corrientes que fluyen a lo largo de la costa (Salas-Pérez y Granados-Barba 2008). La profundidad en el área varía desde menos de 5 m hacia la costa, hasta 40 m hacia mar adentro (fig. 1).

Table 1. Date of deployment and location of the pressure sensors (stations).

Tabla 1. Fecha de instalación y localización de los sensores de presión (estaciones).

Mooring station	Depth of pressure sensor mooring (m)	Initial date (d/m/yr)	Initial hour (h/min)	Final date (d/m/yr)	Final hour (h/min)	Latitude N	Longitude W
1	34.0	29/10/04	12/15	08/12/04	11/45	19.0966	-95.8078
2	31.3	29/10/04	14/30	08/12/04	11/45	19.1147	-95.8709
3	23.0	29/10/04	17/00	09/12/04	12/30	19.0539	-95.8951
4	33.0	31/10/04	13/00	09/12/04	10/15	19.1381	-95.9542
5	22.8	31/10/04	14/30	05/12/04	10/45	19.0927	-96.0606
6	15.8	31/10/04	15/30	05/12/04	11/00	19.1097	-96.0349
7	18.0	31/10/04	16/30	05/12/04	11/30	19.1277	-96.0713
8	23.5	09/11/04	17/55	04/12/04	09/10	19.1347	-96.0422
9	40.5	01/11/04	11/00	04/12/04	10/30	19.2387	-96.0831
10	25.0	01/11/04	13/00	03/12/04	11/00	19.2501	-96.1420
11	16.0	01/11/04	16/15	04/12/04	10/30	19.1983	-96.1061

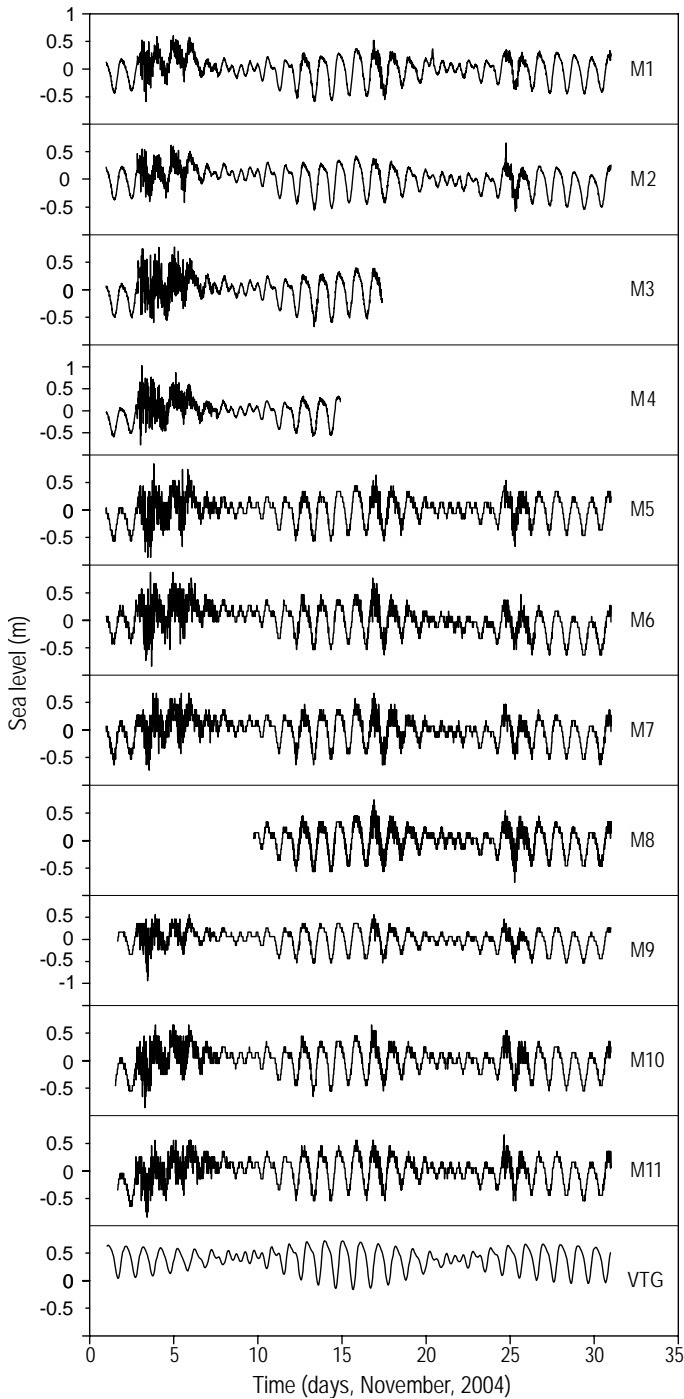


Figure 2. Raw time series of sea level height during November 2004. Stations are indicated on the right side.

Figura 2. Series de tiempo de altura del nivel del mar originales durante noviembre de 2004. Las estaciones se indican del lado derecho.

frequency was obtained as a combination of the M_{sf} and M_f tidal frequencies. During the first days of November, a strong autumn storm produced high frequency oscillations and an increase in SLH, generated by the combination of the inverse barometric effect and the northerly winds that accumulated the water in the VRS.

Datos recolectados y procesamiento

Del 1 al 30 de noviembre de 2004 se instalaron en el SAV once sensores de presión Star-Oddi, con una precisión de 0.01 bares (fig. 1, tabla 1). Los datos crudos obtenidos de ellos en bares fueron convertidos a profundidad en metros (1 bar = 10.1979 m, $\rho = 1027 \text{ kg m}^{-3}$). Finalmente, la presión media en cada estación fue restada de sus respectivas series de datos para obtener las variaciones de la altura del nivel del mar (ANM).

Además, se usaron las series de tiempo del nivel del mar (longitud temporal de un mes) del mareógrafo de Veracruz (VTG)—mantenido y operado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)—para validar las variaciones del nivel del mar registradas con los sensores de presión. El VTG está localizado dentro del puerto de Veracruz (19°12' N, 96° 08' W), por lo que reporta la variación de bajamar inferior del nivel del mar en el área de estudio. Las series de tiempo 3 y 4 (fig. 2) registraron saltos anómalos en la ANM entre el 14 y el 30 de noviembre de 2004, por lo tanto esos datos no fueron utilizados.

Todas las series de ANM fueron filtradas con el filtro tipo-Godin $A_4^2A_5$ (aplicado a series de tiempo medidas a intervalos de 15 min) y $A_{12}^2A_{13}$ (aplicado a series de tiempo medidas a intervalos de 5 min) (Emery y Thomson 1997) para eliminar las altas frecuencias, las cuales pueden ser consideradas como olas o ruido para el propósito de este estudio. Se aplicó un análisis espectral a todas las series del nivel del mar filtradas para obtener las principales frecuencias de la marea en el área. También se aplicó un análisis armónico clásico (Pawlowicz *et al.* 2002) a cada serie de tiempo usando un criterio de Rayleigh de 1, sin inferencia, para obtener las amplitudes y fases de todos los principales armónicos de la marea.

Resultados

Series de tiempo del nivel del mar

Las series de tiempo de la ANM tienen una fuerte señal diurna con una correspondiente modulación quincenal (fig. 3). La frecuencia quincenal fue obtenida como una combinación de las frecuencias de marea M_{sf} y M_f . Durante los primeros días de noviembre una fuerte tormenta de otoño produjo oscilaciones de alta frecuencia, e incrementó la ANM debido a la combinación del efecto del barómetro invertido y los vientos del norte (Nortes) los cuales acumularon agua en el SAV.

Las series de ANM registraron rangos de marea de aproximadamente 1 m, iguales a los rangos de marea de la serie de ANM obtenida del VTG. El promedio, y las máximas y mínimas amplitudes de ANM se muestran en la tabla 2, mientras que en las tablas 3 y 4 se muestran las amplitudes y fases de los principales armónicos. La amplitud máxima fue registrada en la estación 4, mientras que la mínima amplitud durante marea alta fue registrada en la estación 5.

Table 2. Maximum, average, and minimum sea level height registered at the measuring stations and by the Veracruz tidal gauge (VTG).

Tabla 2. Máximo, promedio y mínimo de la altura del nivel del mar registrada en las estaciones de medición y en el mareógrafo de Veracruz (VTG).

Mooring station	Maximum (m)	Average (m)	Minimum (m)
1	0.602	0.00016	-0.597
2	0.652	0.00015	-0.587
3	0.776	0.00045	-0.673
4	1.025	0.00079	-0.774
5	0.836	0.00031	-0.863
6	0.864	0.00027	-0.835
7	0.672	0.00020	-0.727
8	0.735	0.00011	-0.764
9	0.562	0.00021	-0.937
10	0.645	0.00038	-0.854
11	0.651	0.00035	-0.848
VTG	0.727	0.38342	-0.158

The SLH filtered series yielded tidal ranges of about 1 m, equal to the tidal range of the SLH series obtained from the VTG inside the harbor. The mean, maximum, and minimum amplitudes of SLH are shown in table 2, and the amplitudes and phases of the main harmonics are given in tables 3 and 4, respectively. The maximum amplitude was registered at station 4, while the minimum amplitude during high tide was recorded at station 5.

All SLH time series located in the northernmost part of the study area (stations 9, 10, and 11) were highly coherent. The zero lag correlation (R^2) between the VTG time series and all SLH time series were highly correlated (>0.63); however, there was a marked difference in tidal phases among stations. The tidal phase differences were attributed to bathymetric features (table 4). Tides propagate at different speed according to water depth, so a phase lag is generated by bathymetric features.

The spectral analysis of the SLH time series showed a dominance of the diurnal band (fig. 3), though the semidiurnal and low-frequency harmonics were not negligible. Seven tidal harmonics (fortnightly, diurnal, and semidiurnal) were obtained from the harmonic analysis due to the length of the time series. The significant constituents showed reasonably small errors (tables 3, 4) with corresponding high values for the signal to noise ratios for the most energetic harmonics. The diurnal harmonics obtained were K_1 (23.9344 h), O_1 (25.8193 h), and Q_1 (26.8683 h), and the semidiurnal harmonics were M_2 (12.4206 h), S_2 (12 h), and N_2 (12.6583 h), while the fortnightly harmonic was a product of the combination of two close frequencies, M_f and M_{sf} (about 15 days). These seven constituents accounted for more than 84% of the total sea level variance. The most energetic harmonics were K_1 (23.76% > variance > 36.05%), O_1 (24.51% > variance > 37.13%), M_2

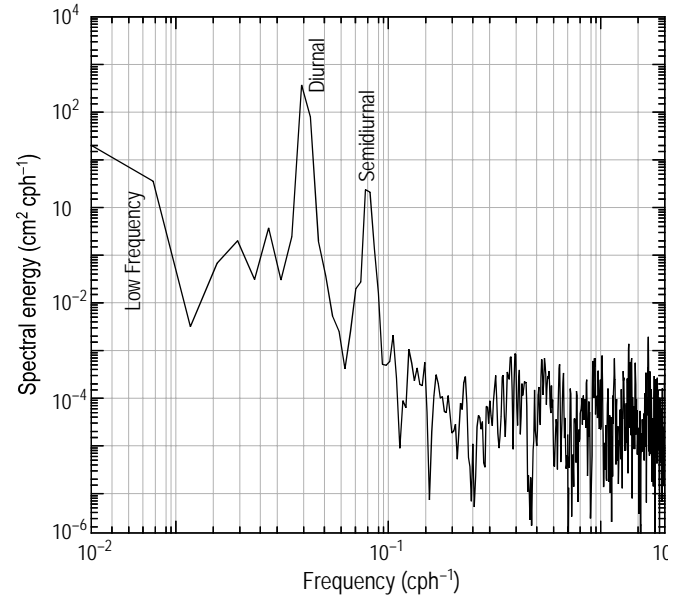


Figure 3. Spectral energy of the sea level height recorded at station 1.
Figura 3. Energía espectral de la altura del nivel del mar registrada en la estación 1.

Todas las series de tiempo de ANM localizadas en la parte más norteña del área de estudio (estaciones 9, 10 y 11) fueron altamente coherentes. La correlación a retardo cero (R^2) entre la serie de tiempo del VTG y todas las series de tiempo de ANM estuvieron altamente correlacionadas (>0.63); sin embargo, hubo una diferencia marcada en las fases de marea entre estaciones. Las diferencias entre las fases de marea se atribuyeron a características batimétricas (tabla 4). Las mareas se propagan a diferente velocidad en relación a la profundidad del agua, por lo tanto hay un retardo de fase generado por características batimétricas.

En el análisis espectral de las series de tiempo de ANM predomina la banda diurna (fig. 3); sin embargo, las bandas semidiurnas y de baja frecuencia no fueron despreciables. Debido a la longitud de las series de tiempo se obtuvieron siete armónicos de marea (quincenal, diurnos y semidiurnos). Los constituyentes significativos mostraron errores razonablemente pequeños (tablas 3, 4) con sus correspondientes altas proporciones entre señal y ruido para los armónicos más energéticos. Los armónicos diurnos obtenidos fueron K_1 (23.9344 h), O_1 (25.8193 h), Q_1 (26.8683 h); los semidiurnos fueron M_2 (12.4206 h), S_2 (12 h) y N_2 (12.6583 h), y se obtuvo un armónico quincenal como producto de la combinación de dos frecuencias cercanas M_f y M_{sf} (aproximadamente 15 días). Estos siete constituyentes contribuyen con 84% de la varianza total del nivel del mar, aunque los armónicos más energéticos fueron K_1 (23.76% > varianza > 36.05%), O_1 (24.51% > varianza > 37.13%), M_2 (10.26% > varianza > 20.42%), S_2 (2.97% > varianza > 4.76%), y el constituyente quincenal (6.21% > varianza > 16.88%).

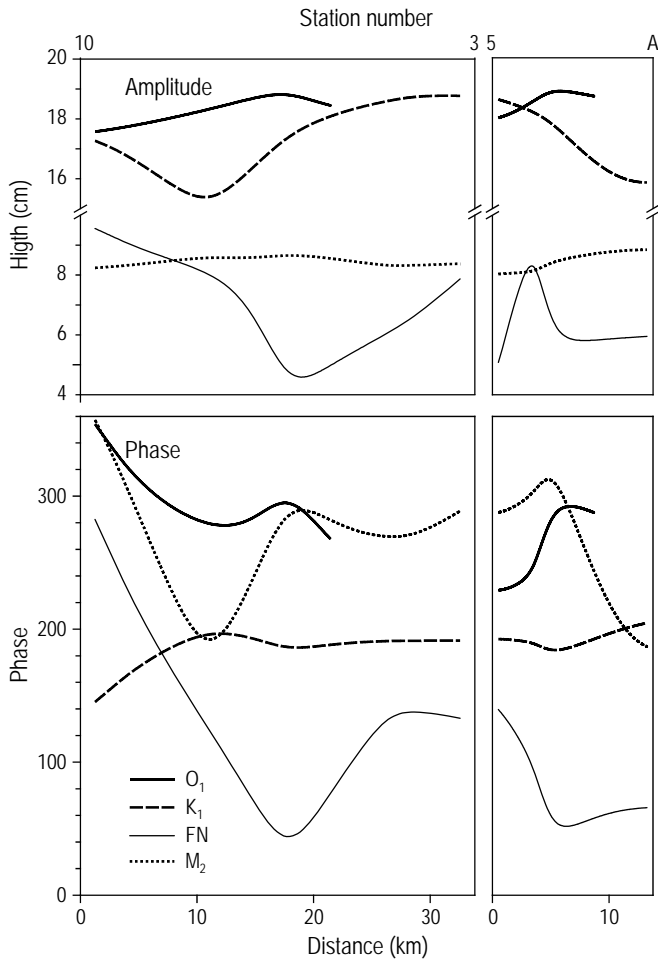


Figure 4. Alongshore (transect from station 10 to station 3 in fig. 1) and across-shore (transect from station 5 to point A in fig. 1) variation of amplitudes and phases of the main harmonics calculated from the harmonic analysis.

Figura 4. Variación de amplitudes y fases a lo largo de la costa (transecto entre las estaciones 10 y 3 en la fig. 1) y al través de la costa (transecto entre la estación 5 y el punto A en la fig. 1) para los principales armónicos calculados del análisis armónico.

(10.26% > variance > 20.42%), S_2 (2.97 % > variance > 4.76%), and the fortnightly constituent (6.21% > variance > 16.88 %).

The amplitudes of the main harmonics were used to compute the Form Number (Emery and Thomson 1997):

$$F = \frac{O_1 + K_1}{S_2 + M_2} = 3.37,$$

revealing a diurnal behavior ($F > 3.0$) in the VRS.

Alongshore transects of the tidal harmonics

The amplitudes of the harmonics were plotted in a transect from station 10 to station 3 (fig. 1) in order to describe the behavior in the alongshore direction (fig. 4). The alongshore

Las amplitudes de los principales armónicos fueron usadas para calcular el Número de Forma (Emery y Thomson 1997):

$$F = \frac{O_1 + K_1}{S_2 + M_2} = 3.37,$$

el cual revela un comportamiento diurno ($F > 3.0$) en el SAV.

Transectos a lo largo de la costa de los armónicos de marea

Las amplitudes de los armónicos fueron graficadas en un transecto a lo largo de la costa (fig. 1, transecto entre la estación 10 y la 3) para describir el comportamiento en esa dirección (fig. 4). Los gradientes de amplitud a lo largo de la costa para los armónicos O_1 y M_2 fueron casi despreciables. Sin embargo, las amplitudes a lo largo de la costa de los constituyentes K_1 y quincenal tienen un fuerte gradiente de las estaciones localizadas frente del Río Jamapa hacia las estaciones 4 y 2 localizadas mar adentro del sur del arrecife coralino. Los gradientes de la fase a lo largo de la costa para los armónicos O_1 , M_2 y el quincenal muestran un marcado retardo de fase a partir de las estaciones 9 y 3, mientras el armónico K_1 tiene un fuerte retardo de fase a partir de la estación 3 a la 6.

Transectos al través de la costa de los armónicos de marea

Los gradientes a lo ancho de la costa (fig. 1, transecto de la estación 5 al punto A) de los armónicos O_1 , M_2 y quincenal tienen un marcado retardo de fase, mientras que la fase del armónico K_1 es más pequeña que la de los otros armónicos, pero no despreciable (fig. 4). La amplitud del M_2 es casi constante en la dirección a través de la costa. Sin embargo, esta tiene una tendencia a disminuir del océano abierto a la costa.

Los gradientes máximos al través de la costa para las amplitudes de los constituyentes K_1 , O_1 y quincenal fueron observados en las estaciones cercanas a la costa. Se observó un comportamiento similar en las fases de los armónicos anteriores al través de la costa. El retardo de la fase al través de la costa sugiere una influencia topográfica en la propagación transversal de la marea.

Distribución de la marea semidiurna

Si bien el análisis armónico resolvió tres constituyentes semidiurnos, los armónicos S_2 y N_2 cuantifican menos del 35% de la varianza total semidiurna; por lo tanto el armónico semidiurno M_2 cuantifica arriba del 65% de la varianza total semidiurna, siendo el armónico de marea semidiurno más significativo en el SAV. La proporción señal-ruido del análisis armónico disminuye para los constituyentes S_2 y N_2 cuando se comparan con el M_2 , principalmente porque la amplitud de la señal de los primeros armónicos disminuye. Así, en esta sección únicamente se analizan la amplitud y la fase de M_2 (fig. 5a, b). La amplitud del anterior constituyente (M_2) fue aproximadamente constante dentro del SAV. Este tiende a

Table 3. Amplitudes and their errors of the main harmonics (cm). Amplitude values are not given in the cases when the harmonics of the sea level height records could not be resolved because of the short temporal length of the time series. VTG = Veracruz tidal gauge.

Tabla 3. Amplitudes y errores de los principales armónicos (cm). Los valores de amplitud ausentes corresponden a los registros para los cuales los armónicos no pudieron ser resueltos dada la corta longitud temporal de las series de tiempo. VTG = mareógrafo de Veracruz.

Constituent	Mooring station											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	VTG
Fortnightly	7.12±0.51	7.51±0.51	9.58±1.07	–	4.91±0.71	10.27±0.96	7.06±0.68	3.33±0.23	5.65±0.55	7.87±0.67	6.50±0.64	3.30±0.19
K ₁	17.47±0.47	17.66±0.51	17.27±1.11	13.93±1.87	18.61±0.63	17.99±0.84	18.80±0.70	18.30±0.22	18.78±0.51	18.77±0.61	18.57±0.72	18.55±0.18
O ₁	17.42±0.50	17.54±0.49	17.57±0.91	–	17.99±0.67	18.51±0.85	17.71±0.66	19.09±0.22	17.96±0.51	17.67±0.66	18.12±0.57	17.19±0.20
Q ₁	4.62±0.49	4.11±0.48	–	–	4.57±0.64	4.30±0.82	4.95±0.70	–	4.60±0.51	5.19±0.67	4.87±0.63	4.19±0.196
M ₂	8.22±0.44	8.33±0.43	8.24±1.03	8.89±1.70	7.99±0.63	7.94±0.73	8.37±0.69	8.60±0.20	8.52±0.53	8.38±0.68	8.16±0.54	8.07±0.18
S ₂	2.07±0.45	2.06±0.51	3.09±0.97	–	2.72±0.70	2.99±0.83	2.55±0.76	2.56±0.21	2.24±0.51	2.48±0.64	2.68±0.64	2.49±0.19
N ₂	2.08±0.48	1.93±0.51	–	–	2.41±0.63	2.37±0.79	1.88±0.61	–	2.04±0.54	1.87±0.68	2.33±0.60	2.02±0.19

Table 4. Phases and their errors of the main harmonics (Greenwich Meridian). VTG = Veracruz tidal gauge.

Tabla 4. Fases y sus errores de los principales armónicos (Meridiano de Greenwich). VTG = mareógrafo de Veracruz.

Constituent	Mooring station											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	VTG
Fortnightly	107.83 ±3.83	116.02 ±4.14	284.56 ±6.10	–	139.46 ±8.43	114.38 ±4.35	120.89 ±5.09	15.31 ±3.59	112.60 ±5.24	133.01 ±4.57	154.67 ±6.46	198.86 ±3.79
K ₁	208.12 ±1.38	208.72 ±1.69	144.37 ±3.70	210.10 ±8.39	192.67 ±1.91	192.87 ±2.83	191.63 ±2.28	175.05 ±0.66	191.87 ±1.63	191.36 ±1.94	191.15 ±2.35	57.30 ±0.70
O ₁	242.79 ±1.51	243.14 ±1.72	355.72 ±3.10	–	229.22 ±1.91	229.06 ±2.51	229.99 ±2.28	320.68 ±0.60	227.81 ±1.72	228.51 ±1.95	228.95 ±1.89	76.59 ±0.66
Q ₁	242.45 ±6.07	244.04 ±6.24	–	–	230.18 ±7.21	230.55 ±11.37	230.53 ±7.01	–	234.37 ±6.62	230.00 ±7.23	233.74 ±8.33	63.13 ±2.68
M ₂	313.87 ±3.68	314.26 ±3.51	358.37 ±7.23	110.99 ±12.80	287.56 ±4.54	287.72 ±5.28	285.93 ±4.65	358.48 ±1.45	283.20 ±3.57	288.83 ±3.96	286.10 ±4.84	1.84 ±1.39
S ₂	163.89 ±12.03	166.64 ±14.27	26.61 ±18.54	–	141.95 ±12.0	143.26 ±15.32	142.07 ±4.77	110.07 ±4.72	144.29 ±13.99	132.83 ±17.29	143.18 ±14.42	259.46 ±4.73
N ₂	311.47 ±13.13	319.60 ±13.70	–	–	285.84 ±15.64	285.38 ±18.72	277.82 ±18.72	–	282.09 ±13.70	286.65 ±21.68	281.00 ±16.15	355.22 ±6.09

gradients of the amplitude for harmonics O_1 and M_2 were almost negligible; however, the amplitudes of the K_1 and fortnightly constituents had a strong gradient from the stations located in front of the Jamapa River toward stations 4 and 2 located seaward from the southern coral reef location. The alongshore phase gradients for the O_1 , M_2 , and fortnightly harmonics showed a marked phase lag from stations 9 to 3, while K_1 had a strong phase lag from stations 3 to 6.

Across-shore transects of the tidal harmonics

The across-shore gradients (transect from station 5 to point A, fig. 1) of the tidal harmonics showed a marked phase lag for the O_1 , M_2 , and fortnightly constituents, while the phase of the K_1 harmonic in the across-shore direction was smaller than for the other harmonics, but not negligible (fig. 4). The amplitude of M_2 was almost constant in the across-shore direction, though it tended to decrease from the open sea toward the coast.

The maximum across-shore gradients for the amplitudes of the K_1 , O_1 , and fortnightly constituents were observed in the coastward stations. A similar behavior was observed for the across-shore phases of the previous harmonics. The across-shore phase lag suggested a topographic influence on the across-shore tidal propagation.

Semidiurnal tidal distribution

Although the harmonic analysis resolved three semidiurnal constituents, the S_2 and N_2 harmonics accounted for less than 35% of the total semidiurnal variance. The semidiurnal M_2 harmonic was thus the most significant semidiurnal tidal harmonic in the VRS, accounting for up to 65% of the total semidiurnal variance. The signal-to-noise ratio in the harmonic analysis decreased for S_2 and N_2 when compared with M_2 , mostly because the signal amplitude of the former harmonics decreased. Therefore, only the M_2 amplitude and phase are analyzed in this section (fig. 5a, b). The amplitude of M_2 was approximately constant within the VRS, tending to decrease from 8.85 cm (offshore) to 7.95 cm near the shore. In front of the Jamapa River (near 19.13°N), the amplitude decreased from the coast toward open waters.

The M_2 phase had a maximum (>333°) around station 8, decreasing from that location toward the coast and toward open waters. Between stations 8 and 6, the phase contours showed a strong gradient. To the south of station 6 the phase moved in a cross- and alongshore direction, increasing from 173° to 293°; however, to the south of Enmedio Island the phase had an alongshore propagation.

Diurnal tidal distribution

The K_1 and O_1 diurnal constituents of the sea level showed some interesting differences (fig. 5c–f). The K_1 sea level amplitude increased from 15 cm around station 4 to 18.75 cm

disminuir de 8.85 cm (mar adentro) hasta 7.95 cm cerca de la costa. En frente del Río Jamapa (cerca de 19.13°N) la amplitud disminuye de la costa hacia mar abierto.

La fase de M_2 tiene un máximo (>333°) alrededor de la estación 8, desde donde disminuye tanto hacia la costa como hacia mar abierto. Entre las estaciones 8 y 6 los contornos de la fase muestran un fuerte gradiente. Al sur de la estación 6 la fase se mueve en dirección perpendicular a la costa, y a lo largo de la costa incrementa de 173° a 293°. Sin embargo al sur de la Isla de Enmedio la fase se propaga a lo largo de la costa.

Distribución de la marea diurna

Los constituyentes diurnos K_1 y O_1 del nivel del mar muestran algunas diferencias interesantes (fig. 5c–f). La amplitud del nivel del mar K_1 incrementa de 15 cm alrededor de la estación 4 a 18.75 cm cerca de la costa. El incremento de amplitud se observó distribuido paralelo a la costa (fig. 5c). En cambio la máxima amplitud del O_1 (>19 cm) cerca de la estación 8 (fig. 5e) decrece hacia la costa y también hacia los lados del área de estudio (norte y sur); las amplitudes observadas cerca de la costa y en los lados norte-sur estuvieron por debajo de 18 cm. La fase K_1 incrementa linealmente desde la costa hacia mar adentro (fig. 5d).

La elevación del nivel del mar K_1 cerca de la costa (fig. 5c) adelanta el nivel del mar fuera de la costa en aproximadamente 30° (~1 h), reforzando la idea de la influencia batimétrica sobre la propagación de la marea en el SAV. Cerca del Río Jamapa la fase de la marea incrementa (fig. 5d) mostrando importantes diferencias en su propagación entre el área norte (líneas cotidianas propagándose en dirección transversal a la costa) y el área sur (líneas cotidianas propagándose casi paralelas a la línea de costa). La fase de la marea O_1 se propagó en una dirección a lo largo de la costa (fig. 5f).

Distribución de la marea quincenal

Los mapas de amplitud y de fase generados de las amplitudes y fases de la frecuencia quincenal (fig. 5g, h), debido a la combinación de los armónicos M_f and M_g , tienen diferentes características de los arrecifes coralinos del norte a las colonias arrecifales del sur. El mapa de amplitud (fig. 5g) muestra una amplificación en la señal quincenal entre 19.12°N y 19.14°N. En las colonias coralinas del norte (arriba de 19.14°N) los valores fluctúan de 3.35 cm (mar adentro) a 7.1 cm (cerca de la costa). Por el contrario, en la región sur cerca de 19.12°N y de los arrecifes Blanca y Chopas las amplitudes disminuyen hacia la costa y mar adentro, con valores que fluctúan de 10.1 cm a menos de 7.85 cm, respectivamente.

La fase quincenal (fig. 5h) incrementa de mar abierto hacia la costa. Sin embargo, hay una pronunciada diferencia en la propagación de la fase entre las áreas norte (arriba de 19.13°N) y sur (debajo de 19.3°N). En la región norte (área poco profunda) la onda de marea se propaga en dirección transversal a la costa, mientras que en la región sur (área profunda) la marea se propaga en dirección a lo largo de la costa.

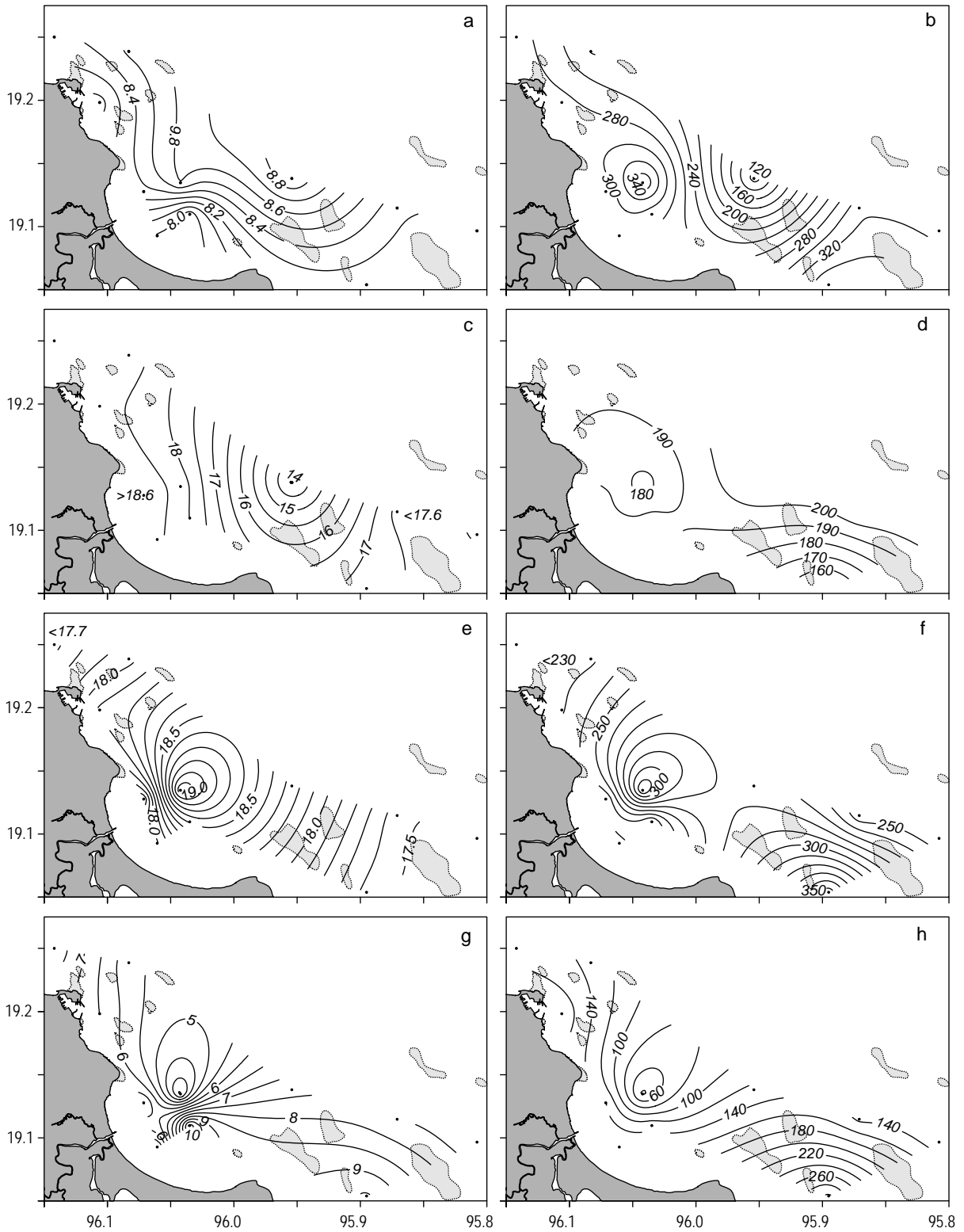


Figure 5. Corange and cotidal maps for the Veracruz Reef System. (a) M_2 amplitude, (b) M_2 phase, (c) K_1 amplitude, (d) K_1 phase, (e) O_1 amplitude, (f) O_1 phase, (g) fortnightly amplitude, and (h) fortnightly phase.

Figura 5. Mapas de amplitud y fase en el Sistema Arrecifal Veracruzano. (a) amplitud de M_2 , (b) fase de M_2 , (c) amplitud de K_1 , (d) fase de K_1 , (e) amplitud de O_1 , (f) fase de O_1 , (g) amplitud quincenal y (h) fase quincenal.

near the coast. The amplitude increment was observed in a parallel distribution relative to the coast (fig. 5c). In turn, O_1 had maximum amplitudes (>19 cm) near station 8 (fig. 5e), which decreased toward the coast and also toward the sides (north and south) of the study area. The amplitudes observed near the coast and north-south sides were below 18 cm. The K_1 phase increased linearly with distance from the coast toward open waters (fig. 5d).

The K_1 sea level elevation near the coast (fig. 5c) leads the offshore sea level by about 30° (~ 1 h), reinforcing the idea of a bathymetric influence on tidal propagation in the VRS. Near the Jamapa River the tidal phase increased (fig. 5d), showing strong differences in its propagation between the northern area (cotidal lines propagating in a cross-shore direction) and the southern area (cotidal lines propagating almost in an along-shore direction). The O_1 tidal phase progressed in an alongshore direction (fig. 5f).

Fortnightly tidal distribution

The cotidal and corange maps generated from the amplitude and phases of the fortnightly frequency (fig. 5g, h), due to the combination of the M_f and M_{sf} harmonics, show different features from the northern coral reef communities toward the southern coral reef colonies. The corange map (fig. 5g) showed amplification in the fortnightly tidal signal between 19.12°N and 19.14°N . In the northern coral colonies (up to 19.14°N) the values ranged from 3.35 cm (offshore) to 7.1 cm (near the coast). Conversely, in the southern region near 19.12°N and close to Blanca and Chopas reefs, the amplitudes decreased toward the coast and open waters, with corresponding values ranging from 10.1 cm to less than 7.85 cm.

The fortnightly phase (fig. 5h) increased from open waters toward the coast; however, there is a marked difference in the phase propagation between the northern (above 19.13°N) and southern (below 19.3°N) areas. In the northern region (shallow area) the tide propagates in an across-shore direction, while in the southern region (deep area) it propagates in an alongshore direction.

Discussion

Eleven pressure sensors were deployed along the VRS from October to December 2004. Sea level height time series were used to elucidate the temporal and spatial features of the tide within the coral reef system. Of the seven major tidal harmonic components obtained by harmonic analysis in the study area, the diurnal harmonics (K_1 and O_1) were the dominant. These harmonics in conjunction with the semidiurnal constituents (M_2 , S_2 , and N_2) and the fortnightly constituents (M_{sf} , M_f) accounted for more than 84% of total sea level variance. This percentage of tide variance concurs with that reported in previous studies conducted in the Gulf of Mexico (DiMarco and Reid 1998, He and Weisberg 2002, Kantha 2005).

Discusión

Se instalaron once sensores de presión a lo largo del SAV de octubre a diciembre de 2004 para obtener series de tiempo de altura del nivel del mar y así dilucidar las características espaciales y temporales de la marea dentro de este sistema arrecifal coralino. De los siete armónicos de marea más importantes obtenidos mediante un análisis armónico en el área de estudio, los armónicos diurnos (K_1 y O_1) fueron los dominantes. Esos armónicos en conjunto con los constituyentes semidiurnos (M_2 , S_2 y N_2) y el quincenal cuantificaron más del 84% de la varianza total del nivel del mar. Este porcentaje de la varianza de marea concuerda con estudios previos realizados en el Golfo de México (DiMarco y Reid 1998, He y Weisberg 2002, Kantha 2005).

Aunque existieron pequeñas diferencias entre las amplitudes calculadas a partir de los sensores de presión y por el VTG, las tendencias de todas las series de tiempo fueron altamente coherentes. Las magnitudes de los armónicos calculados de los sensores de presión y de las obtenidas del mareógrafo localizado en VTG fueron muy semejantes. Las diferencias en amplitudes y fases se atribuyeron a los efectos de Coriolis y la batimetría. La principal diferencia se encontró entre las fases de todos los constituyentes principales. La diferencia en amplitud y fase entre la serie de tiempo del VTG y todas las series de tiempo de los sensores de presión sugiere que los mareógrafos localizados dentro de los puertos no proporcionan información de la marea mar adentro.

El constituyente de marea dominante en el SAV fue el diurno, en contraste con la señal semidiurna previamente reportada para las plataformas continentales, más amplias, de Texas-Luisiana y Florida Oeste (DiMarco y Reid 1998, He y Weisberg 2002). Esta característica es producida por la resonancia diurna debida a la forma del Golfo de México (Grace 1932).

El principal armónico semidiurno fue el M_2 , que mostró amplitudes del mismo orden de magnitud (aproximadamente 8 cm) a las calculados numéricamente (aproximadamente 6 cm) por Salas-de León y Monreal-Gómez (1997).

El armónico quincenal (M_{sf} , M_f) tiene amplitudes del mismo orden o incluso mayores a las amplitudes obtenidas para el armónico M_2 ; en consecuencia, las elevaciones de marea dentro del SAV son generadas por la combinación de los armónicos diurnos (K_1 , O_1), semidiurnos (M_2) y quincenal.

Los mapas de amplitud y fase proveen detalles de la propagación de la marea sobre el SAV. De acuerdo a los modelos numéricos aplicados en el Golfo de México (Grace 1932, Reid y Whitaker 1981, Salas-de León y Monreal-Gómez 1997, Kantha 2005) las amplitudes de marea diurna resultan de la resonancia por la forma del Golfo de México, por lo tanto las amplitudes en el lado occidental del golfo oscilan hacia arriba y hacia abajo casi uniformemente. Así, los contornos de amplitud teóricos en la banda diurna suelen tener amplitudes mayores en la costa y menores hacia mar abierto (Godin 1988). Este comportamiento sólo fue observado en las amplitudes del

Although there were small differences between the amplitudes calculated from all the pressure sensors and the VTG, the trends of all the time series were highly coherent. There was a good agreement between the magnitudes of the harmonics calculated from the pressure sensors and those obtained from the VTG. The differences in amplitudes and phases were attributed to Coriolis and bathymetric effects. The main difference was found between the phases of all major constituents. The difference in amplitude and phase between the VTG time series and all pressure sensor time series suggested that tidal gauges located inside ports do not yield information on the offshore tide.

The dominant tidal constituent in the VRS was diurnal, contrasting with the semidiurnal signals previously reported for wider continental shelves, such as the Texas-Louisiana and West Florida shelves (DiMarco and Reid 1998, He and Weisberg 2002). This feature is produced by the diurnal resonance due to the shape of the Gulf of Mexico (Grace 1932).

The main semidiurnal harmonic was M_2 , which showed amplitudes of the same order of magnitude (about 8 cm) as those computed numerically (about 6 cm) by Salas-de León and Monreal-Gómez (1997).

The fortnightly constituent had an amplitude of the same order or even larger than those obtained for the M_2 harmonic. As a consequence, tidal elevations within the VRS are generated by the combination of diurnal (K_1 , O_1), semidiurnal (M_2), and fortnightly harmonics.

Cotidal and corange maps provide details of the tidal propagation in the VRS. According to numerical models applied to the Gulf of Mexico (Grace 1932, Reid and Whitaker 1981, Salas-de León and Monreal-Gómez 1997, Kantha 2005), the diurnal tidal amplitudes result from the resonance of the shape of the Gulf of Mexico, so the amplitudes are such that the western side of the gulf oscillates up and down almost uniformly. Thus, the theoretical cotidal contours in the diurnal band should have larger amplitudes on the coast and lower amplitudes toward open waters (Godin 1988). This behavior was only observed for the amplitude of the diurnal harmonic K_1 . The amplitudes for constituent O_1 decreased from station 8 toward the coast, a feature that must be produced by abrupt changes in local bathymetry.

The semidiurnal tide behaves as a Kelvin wave, propagating cyclonically around the gulf. Theoretical tidal contours must be perpendicular to the coast, with increasing amplitudes from open water toward the coast. The M_2 amplitude, however, decreased as it approached the coast. This behavior has been documented for the Bight of Abaco, Bahamas (a shallow semi-enclosed basin), using a numerical model to compute the relationship between surface elevation and frictional terms: quadratic bottom friction with a root mean square non-tidal current (Snyder *et al.* 1979).

The phase lag of the M_2 constituent displayed a systematic increase from open waters toward the coast, as expected for a standing wave. The phase lag of the K_1 harmonic decreased from open waters toward the coast. These features were

armónico diurno K_1 ; sin embargo, para el constituyente O_1 la amplitud disminuye de la estación 8 hacia la costa, característica que debe ser producida por los cambios abruptos en la batimetría local.

La marea semidiurna se comporta como una onda de Kelvin que se propaga ciclónicamente alrededor del golfo. Los contornos de esta marea deben ser perpendiculares a la costa, con amplitudes que se incrementa del mar abierto hacia la costa; sin embargo, la amplitud del armónico M_2 disminuye conforme ésta se aproxima a la costa. Este comportamiento ha sido documentado para el Puente de Ábaco, en las Bahamas (una cuenca semi-cerrada de poca profundidad), por medio de un modelo numérico que permitió calcular la relación entre elevación superficial y términos friccionales: fricción cuadrática en el fondo con una raíz cuadrática media de una corriente (Snyder *et al.* 1979).

El retardo de fase del constituyente M_2 muestra un incremento sistemático del mar abierto hacia la costa, como es de esperar para una onda estacionaria. El retardo de fase del armónico K_1 disminuye del mar abierto hacia la costa. Estas características se atribuyeron a la topografía local y a procesos de disipación. La propagación de la marea en el SAV se distorsiona debido a la presencia de islas como ha sido previamente documentado en sistemas similares por Huthnance (1985), Kagan y Kivman (1993).

Hay un cambio de fase en dirección transversal a la costa debido a efectos friccionales. Esto se debe a efectos batimétricos cerca de las islas y arrecifes coralinos (Wolanski 1983, Huthnance 1985, Kagan y Kivman 1993). El máximo nivel de las aguas costeras de todos los armónicos debe estar en fase a lo largo de la costa (Godin 1988); sin embargo, esto no se observó en el SAV debido a la presencia de arrecifes coralinos e islas. Por lo tanto, las diferencias de fase son producidas por los efectos topográficos, i.e. agua poco profunda retarda la velocidad de las ondas debido a que la velocidad de la onda es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad del agua (Godin 1988), por lo que la compleja batimetría del SAV tiene una fuerte influencia sobre las fases de la marea. Las corrientes de marea también deben estar influenciadas por las depresiones locales de la batimetría en forma de canales y arrecifes coralinos, las cuales deben tener un importante efecto sobre el intercambio de agua entre los arrecifes y sus aguas adyacentes, modificando el intercambio de nutrientes, materia orgánica y contaminantes.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por Niños y Crías, AC, con fondos destinados por PEMEX y por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través de los proyectos SEP-CONACYT 59882 y 78773. Queremos agradecer la ayuda de la Armada de México (Tercera Zona Naval de Veracruz) para instalar y recuperar los instrumentos. J Castro mejoró las figuras, y los comentarios de dos árbitros anónimos ayudaron a mejorar el contenido del manuscrito.

attributed to the local topography and dissipation processes. Tidal propagation in the VRS suffers distortion owing to the presence of islands, as previously documented by Huthnance (1985) and Kagan and Kivman (1993) in similar systems.

There was a phase shift in the transversal direction relative to the coast due to frictional effects. This was produced by bathymetric effects near the islands and coral reefs (Wolanski 1983, Huthnance 1985, Kagan and Kivman 1993). Maximum coastal water levels of all harmonics must be in phase along the coast (Godin 1988), but owing to the presence of coral reefs and islands this feature was not observed in the VRS. Phase differences are therefore produced by topographic effects, that is, shallow water retards the speed of the waves since the wave speed is proportional to the square root of water depth (Godin 1988). Thus, the complex bathymetry of the VRS strongly influences the tidal phases. Tidal currents must also be influenced by local bathymetric depressions in the shape of the channels and coral reefs, which should have an important effect on water exchange between the reefs and their adjacent waters, modifying the exchange of nutrients, organic matter, and pollutants.

Acknowledgements

This study was supported by Niños & Crías, AC, with funds provided by PEMEX (Petroleos Mexicanos), and by the Mexican Council for Science and Technology (SEP-CONACYT grants 59882 and 78773). We would like to thank the Mexican Navy at Veracruz for helping to install and recover the instruments during deployments, and J Castro for improving the figures. The comments of two anonymous reviewers improved the content of the manuscript.

References

- DiMarco S, Reid RO. 1998. Characterization of the principal tidal current constituents on the Texas-Louisiana shelf. *J. Geophys. Res.* 103(C2): 3093–3109.
- Emery WJ, Thomson RE. 1997. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon-Elsevier Science Ltd., Oxford, 634 pp.
- Godin G. 1988. *Tides*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México, 290 pp.
- Grace SF. 1932. The principal diurnal constituent of tidal motion in the Gulf of Mexico. *Mon. Not. R. Astronom. Soc. Geophys. Suppl.* 3:70–83.
- He R, Weisberg RH. 2002. Tides on the West Florida Shelf. *J. Phys. Oceanogr.* 32: 3455–3473.
- Horta-Puga G, Carriquiry JD. 2008. Growth of the hermatypic coral *Montastraea cavernosa* in the Veracruz Reef System. *Cienc. Mar.* 34: 107–112.
- Huthnance JM. 1985. Flow across reefs or between islands, and effects on shelf-sea motions. *Cont. Shelf Res.* 4(6): 709–731.
- Kagan BA, Kivman GA. 1993. Modelling of global ocean tides with allowance for island Effects. *Ocean Dyn.* 45(1): 1–13.
- Kantha L. 2005. Barotropic tides in the Gulf of Mexico. In: Wilton S, Lugo-Fernandez A (eds.), *Circulation of the Gulf of Mexico, Observations and Models*. American Geophysical Union, pp. 159–164.
- Mofjeld HO, Wimbush M. 1977. Bottom pressure observations in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Deep-Sea Res.* 24: 987–1004.
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comput. Geosci.* 28: 929–937.
- Reid RO, Whitaker RE. 1981. Numerical model for astronomical tides in the Gulf of Mexico. Texas A&M Univ. Report for US Army Engineers Waterway Experiment Station. College Station, TX, 115 pp.
- Salas-de León DA, Monreal-Gómez MA. 1997. Mareas y circulación residual en el Golfo de México. In: Lavín M. (ed.), *Contribución a la Oceanografía Física en México*. Monografía 3. Unión Geofísica Mexicana, pp. 201–223.
- Salas-Pérez JJ, Granados-Barba A. 2008. Oceanographic characterization of the Veracruz Reef System. *Atmósfera* 21(3): 281–301.
- Snyder RL, Sidjabat M, Filloux JH. 1979. A study of tides, setup, and bottom friction in a shallow semi-enclosed basin. Part II. Tidal model and Comparison with data. *J. Phys. Oceanogr.* 9: 170–188.
- Wolanski E. 1983. Tides on the Northern Great Barrier Reef Continental Shelf. *J. Geophys. Res.* 88(C10): 5953–5959.

*Recibido en diciembre de 2007;
aceptado en octubre de 2008.*