

INFLUENCIA DE LA MAREA EN LA HIDRODINÁMICA DEL SISTEMA MECOACÁN-RÍO GONZÁLEZ, MÉXICO

• Gabriela Medellín* • Ismael Mariño-Tapia •
*Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav)
del Instituto Politécnico Nacional, México*

*Autor de correspondencia

• Adrián Pedrozo-Acuña • Cecilia Enríquez • Fernando González-Villarreal •
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

El estado de Tabasco, México, es altamente vulnerable a inundaciones. La más grave de los últimos años fue en 2007 y cubrió el 62% de su territorio. A raíz de este suceso surgió el Plan Hídrico Integral de Tabasco, con el objeto de encontrar soluciones para disminuir la vulnerabilidad de la zona ante eventos extremos. Una de ellas consiste en el desvío de grandes caudales hacia el río Samaria, que desemboca al mar por el río González. Este estudio analiza el comportamiento de los flujos del sistema río González-Mecoacán y el rol de la marea en su regulación. En el río González, el flujo hacia el mar es disminuido de forma considerable en pleamar, llegando a detenerse durante mareas vivas. En el río Hondo (que fluye del río González hacia Mecoacán), el flujo llega a revertirse, mientras que en la boca lagunar está modulado por la marea. Esto sugiere que un aumento considerable en el caudal del río González estaría sujeto a un lento drenaje hacia el mar por efecto de la corriente mareal. Lo anterior causaría un aumento del nivel del río y riesgo de inundación en esa zona durante eventos extremos. Las evidencias de penetración de la onda de marea hasta un sitio alejado de la desembocadura del río sugieren que el flujo río arriba podría también estar modulado por la marea. Además, las observaciones termohalinas indican que la salinidad y temperatura cerca de la desembocadura están gobernadas por intrusión salina, mientras que en sitios alejados dependerían de factores atmosféricos.

Palabras clave: inundación costera, Tabasco, laguna costera, PHIT.

Introducción

La planicie del estado de Tabasco es altamente vulnerable a inundaciones. Localizado en la cuenca hidrográfica del sistema Grijalva-Usumacinta, este estado presenta el mayor escurrimiento de agua a lo largo del año en el país. El río Usumacinta es el más caudaloso de México, seguido por el río Grijalva. Este último drena la parte alta de estado de Chiapas, convirtiéndose después en el río Samaria; y el río Usumacinta drena la parte alta del estado de Tabasco, así como de Guatemala (Marengo-

Mogollón y Salinas-Urbe, 2003). El sistema Grijalva-Usumacinta incluye innumerables afluentes (e.g. río Mezcalapa), así como una gran cantidad de lagunas que eventualmente se conectan con el sistema en época de lluvias. Asimismo, existen otros caudales importantes, como el del río Tonalá, que sirve de límite entre Tabasco y Veracruz, y el río González, brazo del río Mezcalapa, que desemboca al Golfo de México (figura 1).

En el año 2007, Tabasco sufrió la inundación más grave de los últimos cincuenta años, cubriendo el 62% del territorio del estado (Ri-

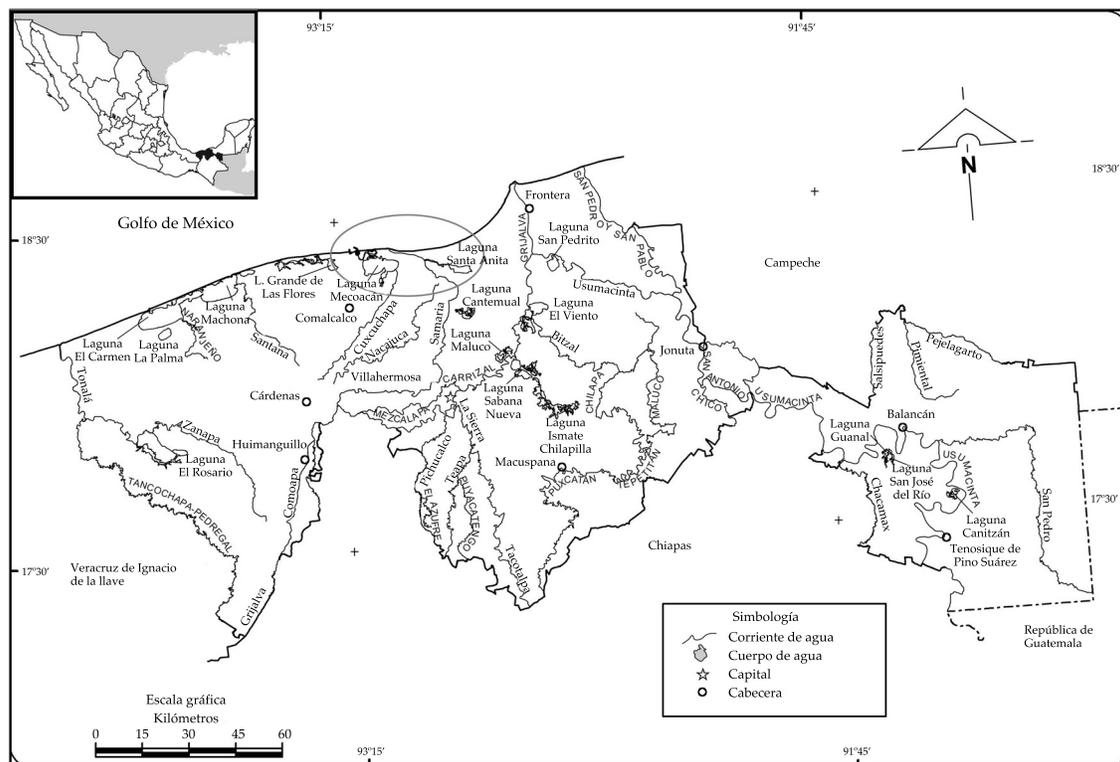


Figura 1. Localización del área de estudio (óvalo), señalando los principales ríos y lagunas; en el recuadro interior, la ubicación del estado de Tabasco. Imagen modificada del *Anuario Estadístico de Tabasco*, edición 2006.

Mapa 8: corrientes y cuerpos de agua. Fuente: INEGI. *Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, 1:250 000*. Serie I. INEGI. *Carta Topográfica, 1:1000 000* (segunda edición). Recuadro interior: www.cuentame.inegi.org.mx. Fuente: INEGI, *Marco Geoestadístico Municipal 2005*.

vera-Trejo et al., 2009). A partir de dichas inundaciones surgió el Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT), con el propósito de encontrar soluciones para disminuir la vulnerabilidad de esta zona ante eventos extremos. Una de las obras planeadas dentro del PHIT para disminuir el riesgo de inundación, sobre todo en la ciudad de Villahermosa (capital del estado), consiste en el desvío de grandes caudales hacia el río Samaria, el cual desemboca al mar por el río González (figura 2).

Con la finalidad de hacer una caracterización de la situación actual del río González y el sistema lagunar que lo rodea, que permitiría estudiar las posibles implicaciones de dicha obra, se diseñó una campaña de campo intensiva en el área. Esta campaña incluyó

mediciones de flujo, nivel y características fisicoquímicas del agua en puntos específicos del sistema, así como un levantamiento batimétrico de todo el sistema, medición de puntos de control en tierra para la posterior obtención de un modelo digital de terreno a partir de imágenes de satélite y perfiles de playa a lo largo de aproximadamente 20 km de costa.

En este trabajo se abordará lo relativo a las mediciones de flujos, niveles y características fisicoquímicas del agua, y su relación con la variación de nivel en el mar exterior. El objetivo es caracterizar el comportamiento del flujo y la variación de la superficie libre en sitios específicos del sistema lagunar de Mecoacán y el río González bajo condiciones

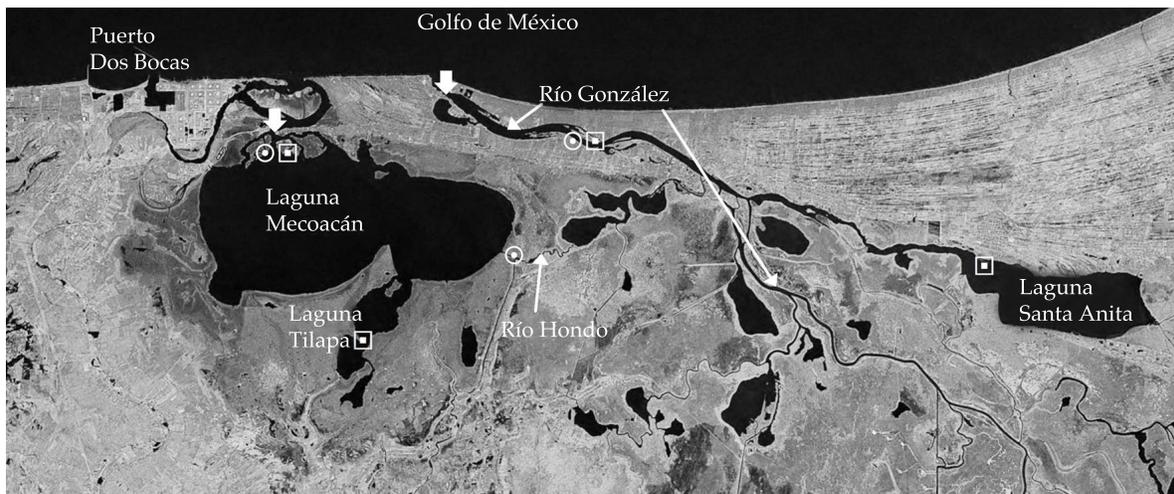


Figura 2. Área de estudio señalando la ubicación de los instrumentos (⊙ = corrientímetro *vector*; □ = CTD (*conductivity, temperature, depth*); ▾ = perfilador acústico ADP). Imagen obtenida de la NOAA.

medias, así como la intrusión de agua marina en el sistema. Además, a partir de las observaciones, se pretende investigar las posibles consecuencias de un aumento de caudal en el río González.

Área de estudio

La zona de estudio se encuentra limitada por las coordenadas 18° 19' y 18° 27' de latitud norte, y 92° 50' y 93° 11' de longitud oeste. Dicha zona está ubicada en la porción más baja de la llanura deltaica del río Mezcalapa, rodeada por zonas pantanosas y vegetación de manglar (figuras 1 y 2). El río González mide alrededor de 500 m en su parte más ancha, presentando una profundidad media entre los 4 y 5 m, con profundidades máximas entre los 9 y 10 m.

Por otra parte, la laguna Mecoacán presenta una dimensión aproximada de 12 km en dirección W-E y 5 km en dirección N-S. Esta laguna, al igual que las lagunas menores, se caracteriza por tener fondo plano con profundidad media de aproximadamente 1.2 m y no se encuentran profundidades mayores a los tres metros, excepto en los canales de la boca, donde se alcanzan profundidades de hasta 6 m.

La marea astronómica al exterior del sistema es predominantemente diurna, con un rango de unos 65 cm en mareas vivas y 15 cm en mareas muertas.

Metodología

Con el fin de obtener información sobre la hidrodinámica y las condiciones termohalinas en el sistema lagunar de Mecoacán y el río González, se realizó una campaña de campo, con una duración aproximada de dos semanas (26/07/2009 a 10/08/2009), en la cual se efectuaron mediciones en la zona de la laguna Mecoacán durante la primera semana, y en la zona del río González durante la segunda.

Para medición de flujos en sitios específicos se instaló un corrientímetro *vector*, que además de aportar datos de la velocidad del flujo en las tres dimensiones, aporta datos del nivel del agua a partir de mediciones de presión. Instrumentos de este tipo se instalaron en la parte interior de la boca de la laguna Mecoacán, a 500 m de la desembocadura del río Hondo hacia la laguna Mecoacán, y a 6 km de la desembocadura del río González (⊙ en figura 2).

Por otro lado, para la medición de conductividad, temperatura y presión, se instalaron instrumentos CTD (*Conductivity, Temperature, and Depth*). Estas variables se midieron al interior de la boca de la laguna Mecoacán y a 6 km de la desembocadura del río González, así como en sitios alejados a las bocas, colocando uno en la laguna Tilapa y otro en la laguna Santa Anita (□ en figura 2).

Por último, se utilizó un corrientímetro acústico ADP (*Acoustic Doppler Profiler*), con el propósito de obtener perfiles de velocidad en toda la columna de agua a través del canal principal de la boca lagunar de Mecoacán y la desembocadura del río González (↓ en figura 2). Estas mediciones se realizaron cada hora durante un ciclo de mareas vivas, con el fin de observar el efecto de las corrientes de marea cuando éstas son más intensas.

A partir de los datos mencionados, y con el propósito de obtener información más detallada sobre la relación entre las distintas variables, se realizó un análisis espectral. El interés de este trabajo se centra en las variaciones diurnas y semidiurnas, principalmente, por lo que en principio se utilizó un filtro de paso bajo para conservar sólo las variaciones de baja frecuencia (de una a cuatro veces por día) de cada serie temporal.

A partir de las series filtradas se calculó el espectro cruzado, para así conocer la relación entre dos series de tiempo. Dicho análisis aporta información acerca de la relación entre las oscilaciones en bandas específicas de frecuencia. Posteriormente, a partir de esta información, se obtuvo la coherencia y la fase entre ambas series de tiempo. La parte real de la coherencia se encuentra entre -1 y 1, mientras que la coherencia cuadrada está entre 0 y 1. Esta última muestra el grado de semejanza entre dos series de tiempo en función de la frecuencia, con valores que van de 0 (nada semejantes) a 1 (idénticas). Numéricamente, se puede interpretar la función de la coherencia como una función del espectro de densidad cruzado normalizada por el producto de la función espectral de energía de ambas series. Al realizar

el análisis de la coherencia, se deben especificar los límites de confianza para los valores de coherencia cuadrada. Si 1- α es el intervalo de confianza del (1- α) 100% que se desea especificar para una función de coherencia en particular, entonces, para todas las frecuencias, el valor límite para la coherencia cuadrada (el nivel a partir del cual los valores de coherencia cuadrada pueden ocurrir por azar) está dado por (Emery y Thomson, 1997):

$$\gamma_{1-\alpha}^2 = 1 - \alpha^{[1-(\text{EDOF}-1)]}$$

donde $\text{EDOF} = \text{DOF}/2$ (*Equivalent Degrees of Freedom*) es el número de observaciones coespectrales independientes en cada banda de frecuencia (Thompson, 1979). Los intervalos de confianza más utilizados son 90, 95, y 99%, que corresponden a los intervalos de significancia $\alpha = 0.10, 0.05, \text{ y } 0.01$, respectivamente. En este estudio se utiliza un intervalo de confianza del 90%. Por último se calcula la diferencia de fase entre dos series de tiempo como una función de la frecuencia. La diferencia en fase determina el retraso o avance de una oscilación en relación con otra para una frecuencia dada.

Resultados

En esta sección se presenta un análisis de las observaciones obtenidas durante la campaña de campo, las cuales permiten conocer el comportamiento hidráulico del sistema e inferir su respuesta a posibles modificaciones.

a) Variación del caudal en la boca de la laguna Mecoacán y la desembocadura del río González durante un ciclo de marea

A partir de los perfiles de velocidad ($u(x,z,t)$, $v(x,z,t)$) obtenidos de las mediciones realizadas con el ADP, tanto en la parte interior de la boca de la laguna Mecoacán como en la desembocadura del río González, se calculó el caudal promedio por hora que fluye a través de la sección transversal ubicada en el transecto

señalado en la figura 2 (↓) durante un ciclo de marea.

Al comparar la serie temporal de caudal promedio con la serie temporal de la predicción de nivel del mar en el exterior, se observa que la dirección promedio del flujo en la boca de la laguna Mecoacán se revierte cada vez que sube o baja la marea, tal y como se esperaba (figura 3a). Los valores positivos de Q indican flujo hacia el mar, y los negativos indican flujo hacia la laguna. El valor del caudal, Q , es máximo en dirección hacia el mar ($+Q$) cuando la marea es mínima (bajamar). En cambio, cuando el flujo es dominante en dirección a la laguna ($-Q$), el caudal alcanza su valor máximo durante la pleamar. Cabe señalar que la magnitud del caudal alcanza un valor mayor cuando el flujo es hacia el mar ($\sim 361 \text{ m}^3/\text{s}$) que cuando es hacia la laguna ($\sim 312 \text{ m}^3/\text{s}$). El flujo es controlado por el gradiente de presión asociado con la onda de marea.

El comportamiento del caudal en la desembocadura del río González (figura 3b), el cual también está gobernado por los cambios en el nivel del mar, es similar al observado en la desembocadura de la laguna Mecoacán, ya que las ondas se encuentran también en oposición de fase. Sin embargo, a diferencia de la laguna, el valor del caudal promedio en la desembocadura del río es siempre positivo, es decir, el flujo dominante es siempre en dirección hacia el mar. En cuanto a la magnitud del caudal, ésta es máxima durante la bajamar, cuando el flujo del río es dominante y encuentra menor resistencia. Asimismo, durante la pleamar, el valor del caudal es mínimo, siendo casi nulo cuando las corrientes del río y de la marea se oponen.

Se ha observado que durante mareas vivas, la disminución de la intensidad del flujo del río es aún más evidente, llegando casi a detenerse por completo. Lo anterior se debe tomar en cuenta en caso de planear el aumento de caudal en el río, ya que éste se vería sujeto a un lento drenaje hacia el mar durante marea alta en mareas vivas. Dicho efecto podría incrementarse en el caso de una sobreelevación

del nivel del mar debido a eventos extremos (marea de tormenta).

b) *Regulación del flujo por la marea en sitios cercanos a las desembocaduras*

Se presentan las observaciones obtenidas con el corrientímetro tridimensional *vector* durante aproximadamente una semana en un sitio cercano a las bocas de la laguna Mecoacán, el río Hondo, y el río González (⊙ en figura 2). Los datos de presión están dados en decibares (db), y un db equivale de manera aproximada a un metro de columna de agua (mca), por lo que la presión se presenta en unidades de metros. Por otro lado, a partir de las componentes horizontales de velocidad de flujo, es posible calcular la dirección y magnitud del flujo a cada paso de tiempo (figura 4).

En el caso de la laguna Mecoacán, el instrumento se colocó al interior del canal principal de la boca de la laguna, a una profundidad de unos 3 m.

Se observa que la variación de nivel en la boca lagunar está gobernada por los cambios en el nivel del mar exterior, η , presentando atenuación y desfase de la onda de marea (figura 4a). La amplitud de la variación de nivel al interior de la boca lagunar es de aproximadamente la mitad de la observada en el mar, y los máximos y mínimos de nivel ocurren primero en el mar que en la boca de la laguna, siendo mayor el desfase en la pleamar que en la bajamar. Es decir, el nivel tarda más en subir que en bajar al interior de la laguna.

En cuanto a la velocidad y dirección de flujo, se observa que la dirección del flujo es hacia el sur (hacia la laguna) durante la marea llenante y viceversa; la dirección es hacia el mar (N), con pequeñas variaciones hacia el noroeste (NW) y noreste (NE) durante la marea vaciante. Por otro lado, en cuanto a la magnitud de la velocidad del flujo, las velocidades menores corresponden a pleamar y bajamar. Las velocidades mayores ocurren durante la marea llenante y vaciante, presentándose los valores máximos (que alcanzan los 0.35 m/s)

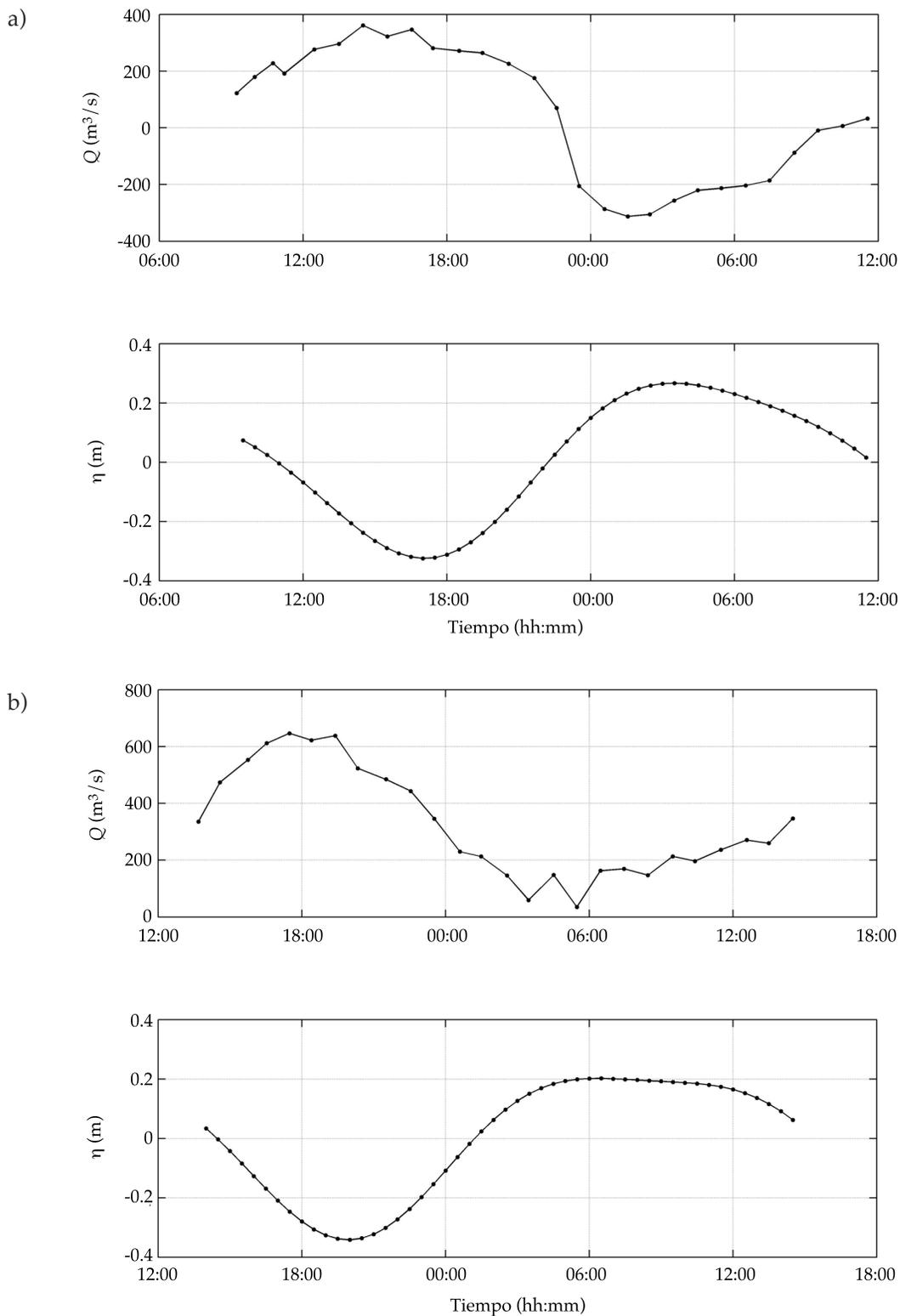


Figura 3. Serie temporal de caudal, Q , medido durante un ciclo de marea, η , en mareas vivas, a) en la boca de la laguna Mecoacán y b) la desembocadura del río González.

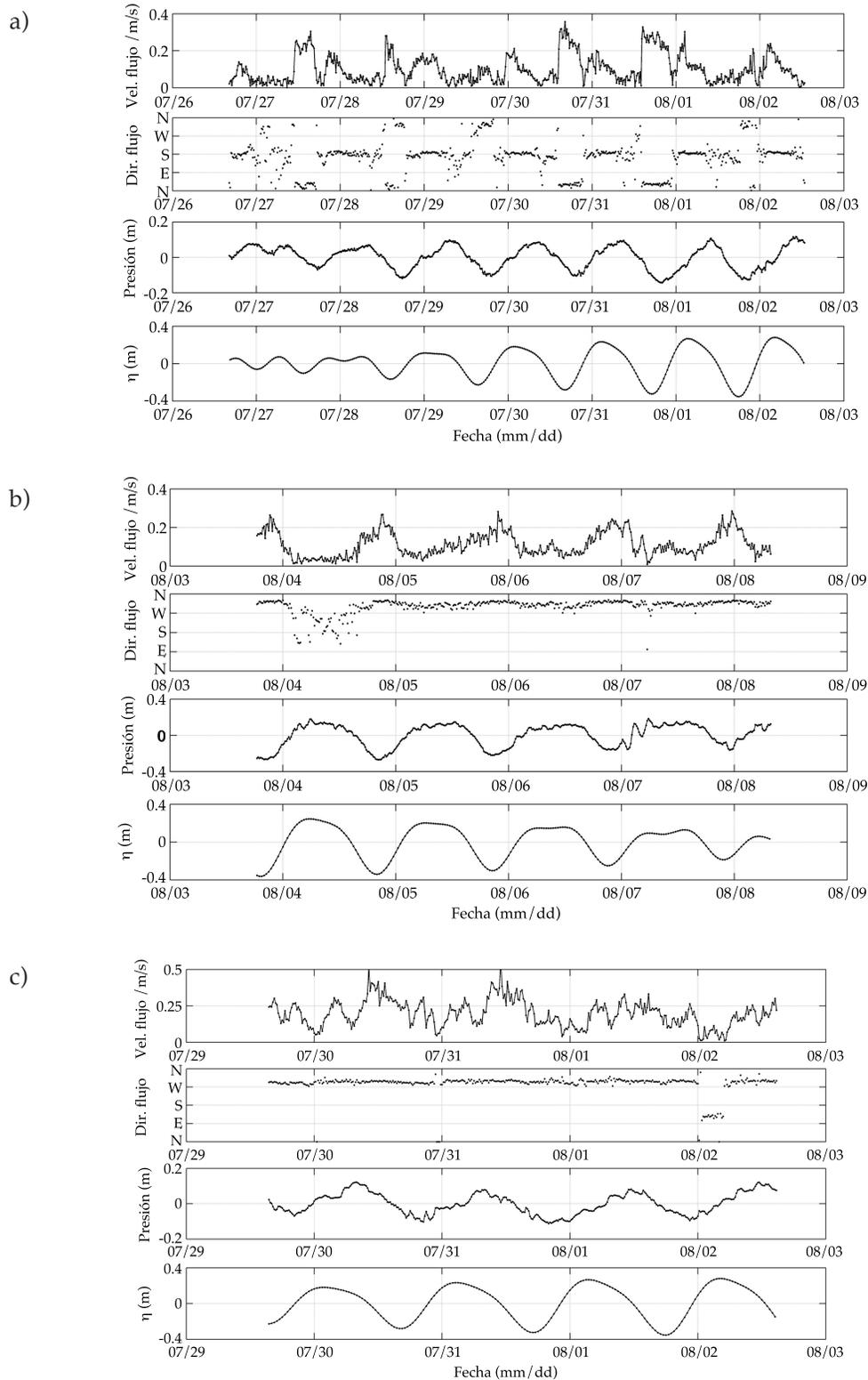


Figura 4. Series temporales de velocidad de flujo, dirección de flujo y presión observadas a) en el interior de la boca de la laguna Mecoacán; b) a ~6 km de la desembocadura del río González, y c) a ~500 m de la desembocadura del río Hondo (© figura 5), así como variación del nivel en el mar exterior (η).

durante esta última. Estos datos, al igual que los obtenidos con el ADP (presentados en la sección anterior), indican un claro intercambio de agua a través de la boca lagunar de Mecoacán, donde el flujo está condicionado por las variaciones de nivel del mar exterior.

La relación entre las variaciones de las tres componentes de la corriente en el interior de la boca de la laguna Mecoacán con relación a las variaciones de nivel en el mismo punto, se pueden observar en la figura 5a. Los espectros cruzados muestran un pico de energía alrededor de la frecuencia diurna en todos los casos, siendo de mayor intensidad para la componente v , en la cual se observa también un pico menor en la frecuencia semidiurna. Las componentes horizontales u y v presentan un pico negativo, mientras que para la componente w es positivo y de menor intensidad. Ello quiere decir que la corriente N-S (v) es negativa (en dirección hacia el sur) cuando aumenta el nivel (marea llenante) y positiva (en dirección al norte) cuando baja el nivel (marea vaciante), mientras que para w existe flujo hacia arriba al aumentar el nivel y viceversa. La coherencia es más alta para la componente en la dirección predominante de propagación de la onda de marea v (~ 9), seguida por la componente w (~ 0.7), y la coherencia más baja la presenta la componente u (0.6), la cual se encuentra por debajo del límite de confianza. El desfase para la frecuencia diurna es de entre 125 y 135° (8-9 h) para las componentes u y v , y de $\sim -45^\circ$ (-3 h) para la componente w .

En el caso del río González, el instrumento se colocó sobre la margen oeste del río a una distancia de unos 6 km de la desembocadura y a una profundidad de 3.7 m. En este punto del río González se observa una atenuación y un desfase de la onda de marea mucho menor al observado en el caso de la boca de la laguna (figura 4b). Por lo tanto, la variación de nivel es ligeramente menor a la observada en el mar, ambas con una amplitud de aproximadamente 0.2 m, la cual va disminuyendo a lo largo del tiempo en ambos sitios. En general, se observa que la variación de nivel a 6 km de la

desembocadura del río está gobernada por la variación de nivel en el mar exterior.

En cuanto a la velocidad del flujo, ésta se encuentra modulada por los cambios de nivel. Se observa que la velocidad del flujo disminuye de manera notable al aumentar el nivel, cuando la corriente de marea se opone al flujo del río. Esto se observa con mayor claridad cuando la carrera de marea es mayor, al inicio del día 4 de agosto (08/04), cuando el flujo disminuye por un periodo prolongado y la dirección del flujo se vuelve muy dispersa. Ello es significativo, ya que la dirección del flujo es persistente hacia el NW (hacia el mar), excepto durante el periodo mencionado.

A partir del cálculo del coespectro, se observa que la relación entre las componentes de velocidad y el nivel muestra un pico de concentración de energía en la frecuencia diurna y uno menor en la semidiurna para todos los casos (figura 5b). La coherencia es alta (~ 1) para la frecuencia diurna y semidiurna para las tres componentes. Sin embargo, el valor de la coherencia para la frecuencia diurna se encuentra por arriba del límite de confianza de 90% sólo para las componentes u y v . La componente w está en fase con las variaciones de nivel, mientras que las componentes u y v se encuentran en oposición de fase ($\pm 180^\circ$ o 12h), lo que significa que la velocidad de la corriente en dirección NW disminuye al aumentar el nivel y viceversa.

Al este de la laguna Mecoacán desemboca el río Hondo (figura 2). El corrientímetro *vector* se colocó a unos 500 m de la desembocadura del río y a 4.7 m de profundidad (figura 4c). Al igual que en la boca de la laguna, se observa que la variación de nivel en el río está gobernada por la variación del nivel del mar exterior, con un evidente desfase (~ 7 h) y atenuación de la amplitud de la onda, siendo la amplitud de la variación en el río aproximadamente la mitad de la observada en el mar.

La velocidad del flujo presenta una variación diurna en relación con los cambios de nivel, además de fluctuaciones de menor periodo debidas a procesos locales (figura 4c).

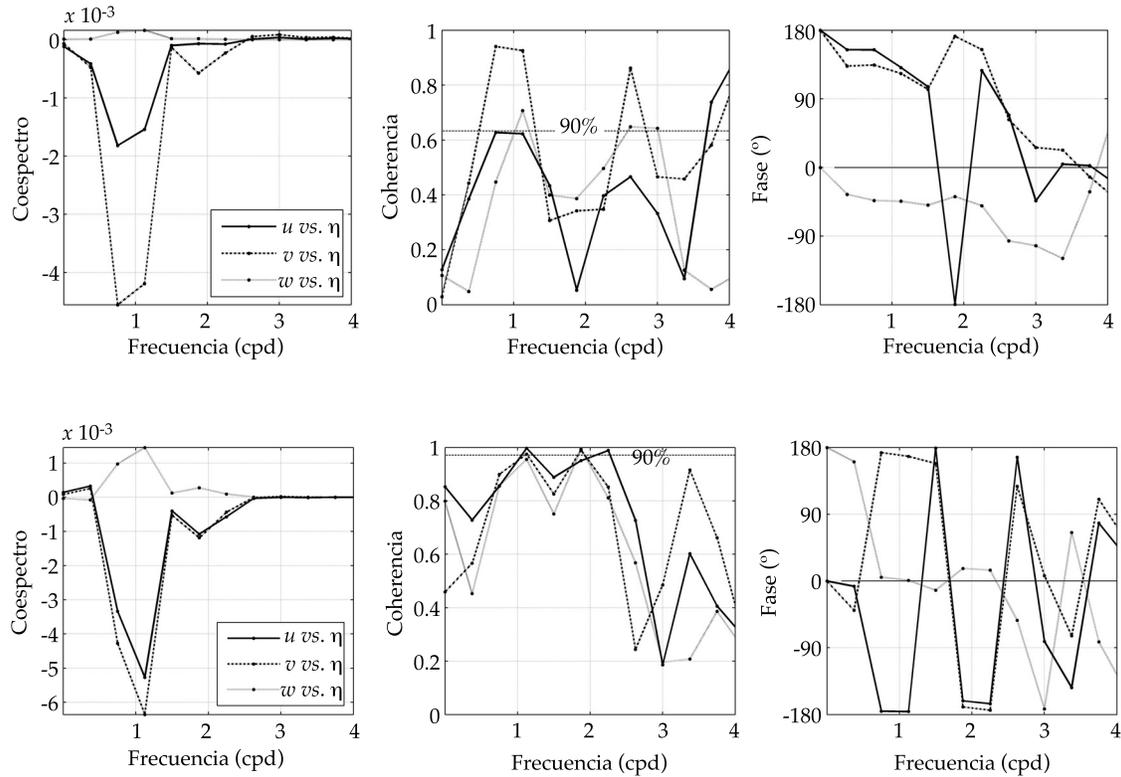


Figura 5. Coespectro, coherencia y fase entre las series temporales de variaciones de baja frecuencia de las tres componentes de la velocidad (u , v , w) y el nivel (η) a) en el interior de la boca de la laguna Mecoacán y b) a 6 km de la desembocadura del río González.

Respecto a la variación diurna, las velocidades menores ($V \sim 0.04$ m/s) ocurren cuando el nivel en el río comienza a subir, y las velocidades mayores ($V \sim 0.5$ m/s) cuando el nivel comienza a bajar. Esto es de esperarse, ya que las corrientes generadas por los cambios de nivel se contraponen al flujo del río cuando el nivel está subiendo, disminuyendo así la velocidad del flujo, y van en la dirección de la corriente del río cuando el nivel está bajando. Es interesante observar que la dirección del flujo en el río es persistente hacia el oeste-noroeste (WNW), con excepción de las primeras horas del día 08/02, cuando el flujo se revierte por completo hacia el este-sureste (ESE) durante aproximadamente cuatro horas. Durante ese mismo periodo se observa también una disminución en la velocidad del flujo ($V \sim 0.01$ m/s) y un aumento en la amplitud de la marea exterior respecto

a los días anteriores, que podría traducirse en una mayor intensidad de la corriente inducida por la marea.

Lo anterior indica que la corriente inducida por la marea es capaz de revertir el flujo del río en dirección al río González. Esto es importante de tomar en cuenta al planear el desvío de grandes caudales hacia el río González, ya que el río Hondo representa una vía de descarga del río González hacia la laguna Mecoacán.

c) *Intrusión de agua marina y penetración de la onda de marea en sitios cercanos y lejanos a las desembocaduras*

A partir de las mediciones obtenidas con el CTD anclado en sitios cercanos a las bocas (□ figura 2), es posible conocer el grado de intrusión de agua marina al sistema. En el caso

de la laguna Mecoacán, el instrumento se ancló junto al *vector* a unos 3 m de profundidad. Las series temporales de temperatura, salinidad, y densidad (figura 6a) muestran un claro intercambio de agua a través de la boca lagunar en cada ciclo de marea. Al subir el nivel es notable la intrusión de agua marina, ya que coincide con una disminución de la temperatura, y un aumento en la salinidad y densidad.

En cambio, a 6 km de la desembocadura del río González (figura 6b) se observa una clara intrusión de agua marina sólo durante la pleamar del día 04/08, cuando la temperatura disminuye de forma notable; la salinidad aumenta hasta casi 35 psu, y la densidad potencial $\sigma\text{-}\theta$ se incrementa hasta $\sim 25 \text{ kg/m}^3$. El resto del tiempo no se observa intrusión de agua marina de manera tan notoria, en gran parte debido a que la amplitud de la onda de marea va disminuyendo en los días siguientes.

Con base en las observaciones de nivel en sitios cercanos a las bocas en la sección anterior, es evidente que existe una clara penetración de la onda de marea tanto en el caso de la laguna como en el caso del río. Sin embargo, la intrusión de agua marina ocurre en cada ciclo de marea en el caso de la laguna y en el caso del río ocurre sólo durante la pleamar en mareas vivas.

En cuanto a las mediciones realizadas con el CTD en sitios alejados de las bocas, se observa que al sur de la laguna Mecoacán (laguna Tilapa, figura 2) todas las variables presentan una variación diurna (figura 7a). La variación de nivel en la laguna Tilapa, medida por el sensor de presión del CTD y dada en cm, se debe de manera principal a la marea. Las ondas son muy similares en forma, aunque como se esperaba, difieren en amplitud y fase. La amplitud de la onda es aproximadamente la mitad en la laguna ($\sim 10 \text{ cm}$) respecto a la observada en el mar ($\sim 20 \text{ cm}$), y existe cierto desfase, ocurriendo los máximos de nivel en la laguna Tilapa varias horas ($\sim 8 \text{ h}$) después de ocurrir en el mar. Por otro lado,

la temperatura y conductividad se encuentran en fase (figura 7a), y por tanto su variación no puede ser consecuencia de intrusión de agua marina hasta este punto, ya que en ese caso se observaría de manera simultánea menor temperatura y mayor salinidad.

Las observaciones en la laguna Santa Anita, al sur del río González (figura 2), indican que existe penetración de la onda de marea, pero no hay evidencias de intrusión de agua marina (figura 7b). La variación de nivel en la laguna parece estar gobernada por la variación del nivel del mar exterior; se observa que la amplitud de las variaciones en ambos sitios disminuye al paso del tiempo, aunque existe una atenuación y desfase de la onda importantes ($\eta_{SA} \approx \eta_{ext}/2$, $\sim 6 \text{ h}$). En cuanto a la temperatura del agua en la laguna Santa Anita, ésta presenta también una variación diurna que no es consecuencia de intrusión de agua marina en cada ciclo de marea, ya que la conductividad es prácticamente nula en este sitio.

Además, se calculó el coespectro entre salinidad/conductividad y temperatura para obtener información de la relación entre dichas propiedades físicas del agua en un sitio específico cerca de las bocas y lejos de las bocas tanto en la zona de Mecoacán como en la zona del río González (figura 8). En caso de intrusión de agua marina por efecto de la marea, la salinidad y temperatura guardarían una estrecha relación inversamente proporcional (pico negativo) en la frecuencia diurna (frecuencia de variación del nivel en el mar exterior); en otras palabras, su desfase sería cercano a los 180° .

En la zona de la laguna Mecoacán (figura 8a) se observan las características propias de intrusión de agua marina en el coespectro, la coherencia y la fase para el caso del interior de la boca de la laguna: un evidente pico negativo (aumento de salinidad al disminuir la temperatura y viceversa), coherencia muy cercana a uno en la frecuencia diurna y semi-diurna, y un desfase de 180° . Sin embargo, en la laguna Tilapa, la relación es distinta.

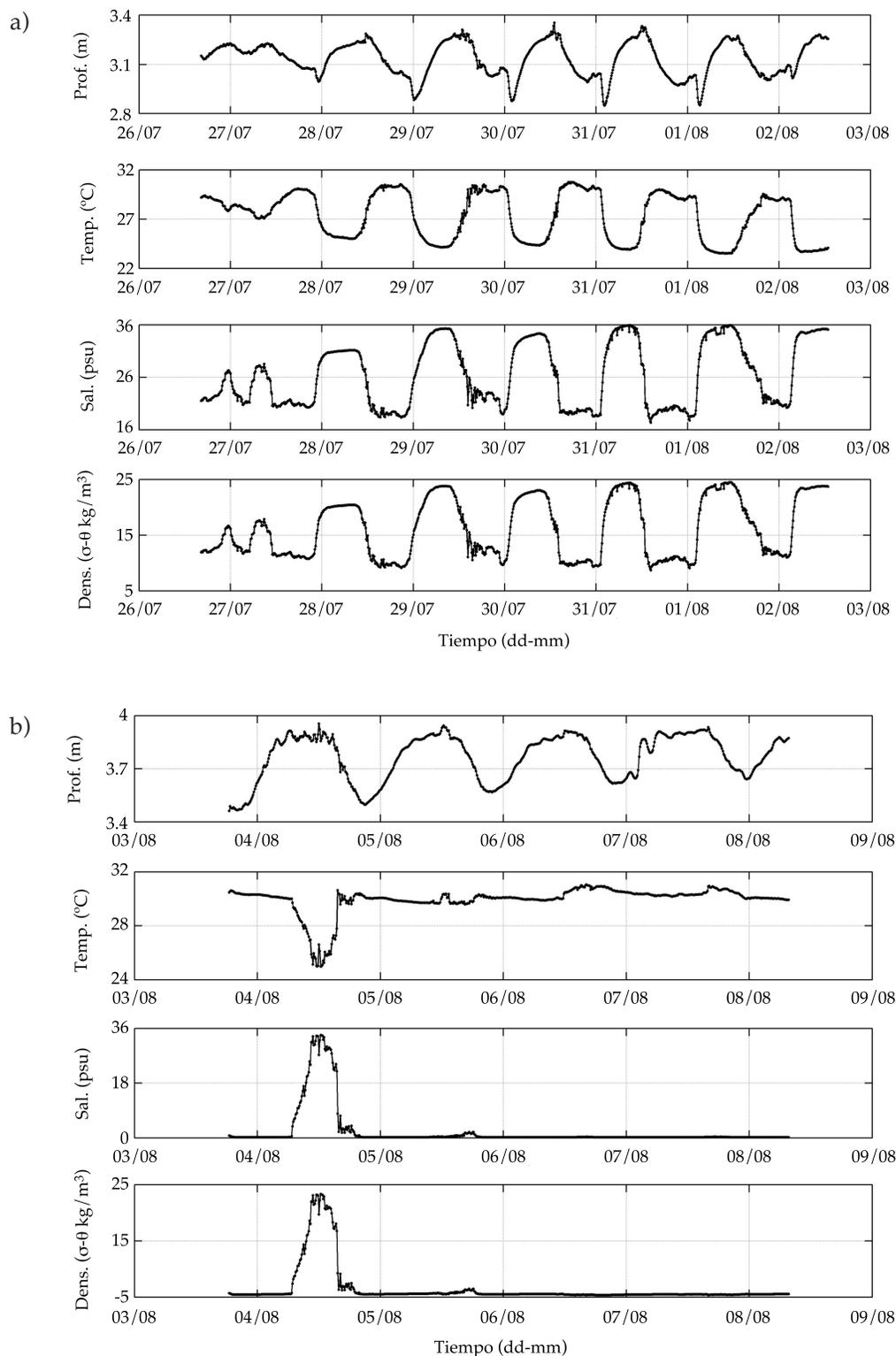


Figura 6. Series temporales de variaciones de nivel, temperatura, salinidad y densidad observadas a) en el interior de la boca de la laguna Mecoacán y b) a ~6 km de la desembocadura del río González.

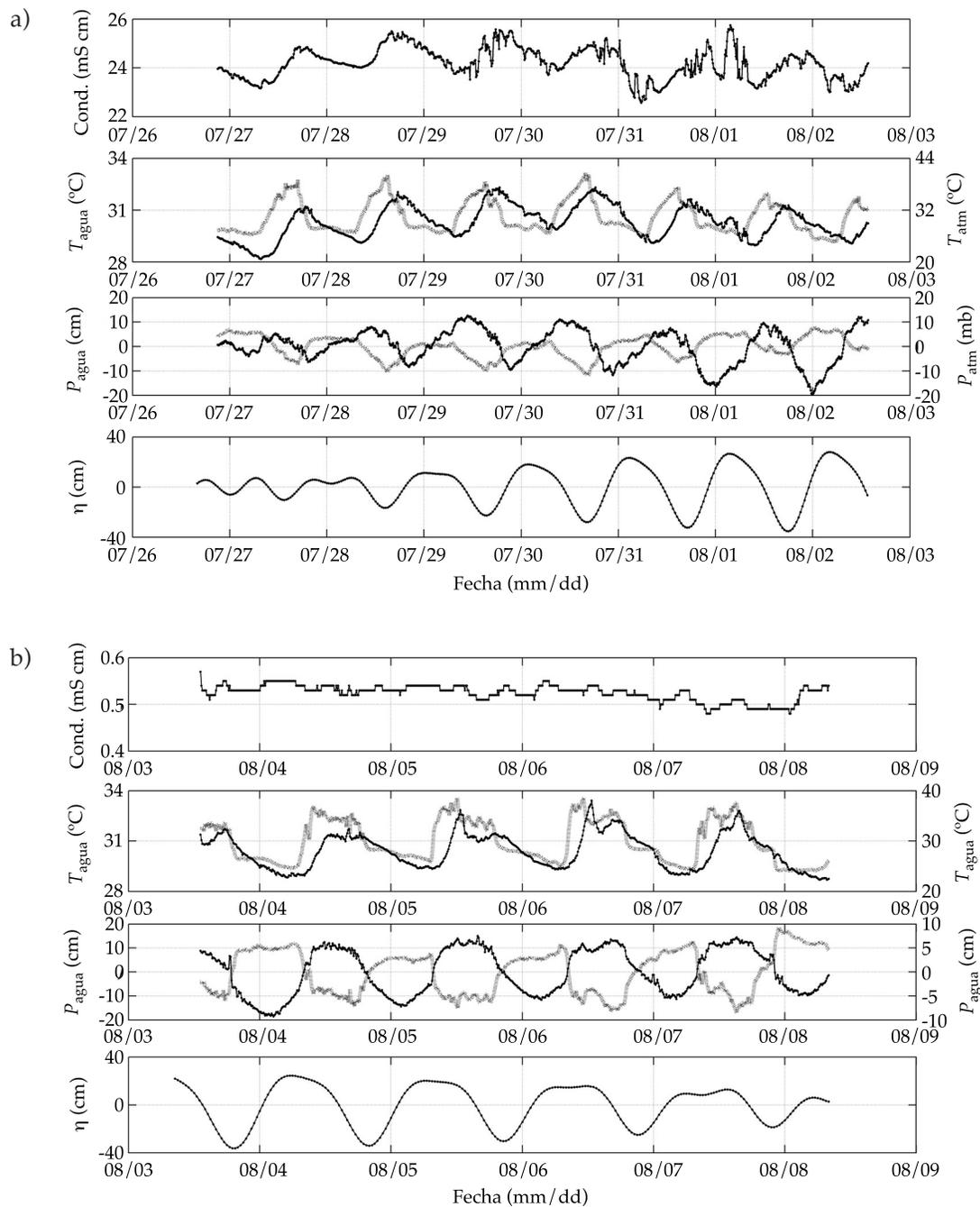


Figura 7. Series temporales de variaciones de conductividad, temperatura y presión, observadas a) en la laguna Tilapa y b) la laguna Santa Anita, comparando con temperatura y presión atmosféricas (línea gris), y variación del nivel en el mar exterior (η).

Se observa un pico positivo en la frecuencia diurna entre conductividad y temperatura asociado con una alta coherencia y ambas variables prácticamente en fase ($\sim 0^\circ$).

Por otra parte, en la región del río González (figura 8b), la situación es similar. Se observa un pico negativo alrededor de la frecuencia diurna a 6 km de la desembocadura, con una

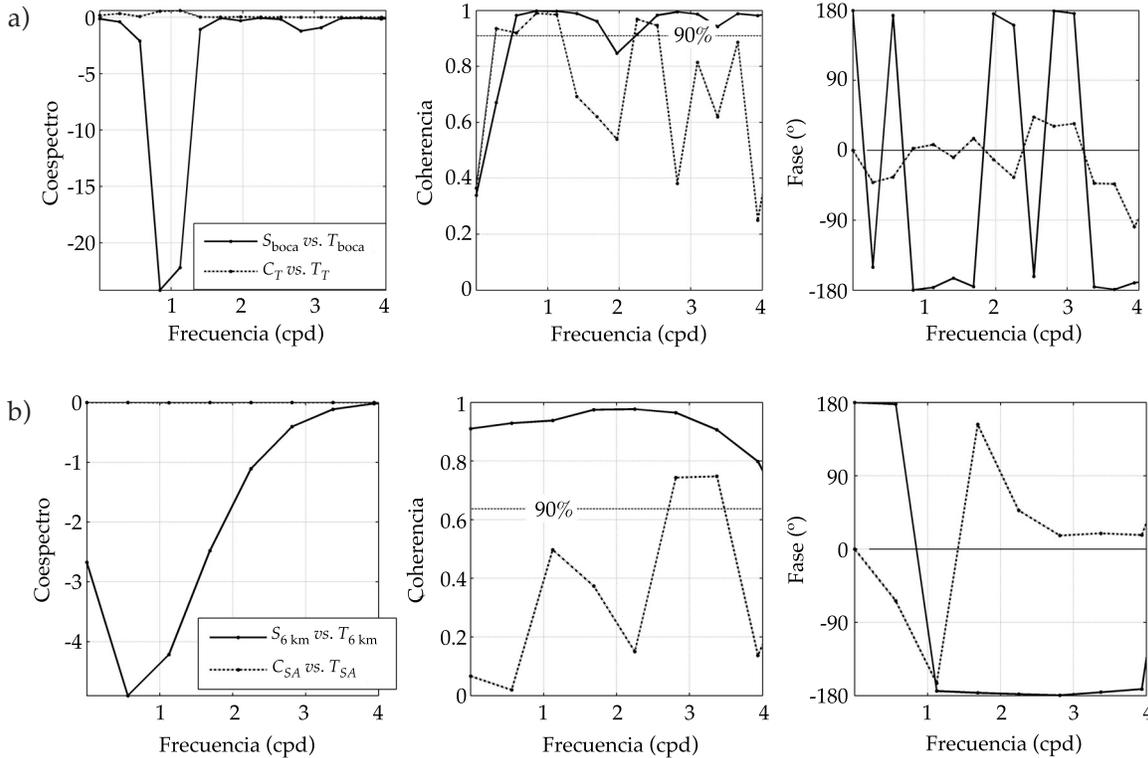


Figura 8. Coespectro, coherencia y fase entre las series temporales de variaciones de baja frecuencia de salinidad versus temperatura cerca de las bocas (S_{boca} versus T_{boca} , S_{6km} versus T_{6km}), y de conductividad versus temperatura lejos de las bocas (C_T versus T_T , C_{SA} versus T_{SA}) en la zona de a) la laguna Mecoacán y b) el río González.

coherencia mayor a 0.9 y un desfase de 180° , mientras que en la laguna Santa Anita (SA) no se observa una relación clara entre conductividad y temperatura (no se advierte concentración de energía en ninguna frecuencia) y la coherencia es baja para todas las frecuencias.

Lo anterior sugiere una vez más que existe intrusión de agua marina en los sitios cercanos a las bocas, siendo evidente en cada ciclo de marea en el caso de la laguna Mecoacán y sólo durante mareas vivas en el caso del río González, mientras que en los sitios alejados de las bocas no existe evidencia de intrusión de agua marina.

Como se ha mencionado, la variación de nivel en sitios cercanos y lejanos a las desembocaduras se encuentra gobernada principalmente por la variación de nivel en el mar exterior, observando cierta atenuación,

desfase y deformación de la onda (figura 4 y 7). Para explorar esta relación con más detalle, se calculó el espectro cruzado entre el nivel en el mar exterior y el nivel medido en sitios cercanos a las bocas, así como entre este último y el nivel en sitios alejados a las bocas.

El coespectro entre las variaciones de nivel en la zona de la laguna Mecoacán (figura 9a) presenta un pico evidente de energía en la frecuencia diaria para ambos casos (η_{boca} versus η_{ext} y η_T versus η_{boca}). Existe también un segundo pico de menor importancia entre el nivel exterior y el nivel en la boca, que corresponde a frecuencia semidiurna, el cual no aparece en el espectro cruzado con Tilapa. La coherencia es máxima (~ 1) para la frecuencia diaria y semidiurna, observando un desfase de unos 60° en la frecuencia diaria, lo que equivale a aproximadamente cuatro horas para ambos

casos. Para la frecuencia semidiurna, el desfase es también de 60° (2 h) entre el nivel exterior y el nivel en la boca, y de 90° (3 h) entre el nivel en la boca y el nivel en la laguna Tilapa (η_T). Con base en lo anterior, se puede concluir que las variaciones de nivel tanto en el interior de la boca de la laguna Mecoacán como en la laguna Tilapa se deben en gran parte a las variaciones de nivel en el mar exterior (penetración de la onda de marea).

Por otra parte, en la zona del río González, al comparar la onda de marea de un sitio a otro, se observa que en el exterior, la onda se encuentra casi en fase con la observada a 6 km río arriba de la desembocadura; mientras que en la laguna Santa Anita, el desfase es evidente (figura 9b). La magnitud de dicho desfase es de 68° o 4.5 h para la frecuencia diurna (figura 9b). Sin embargo, el desfase entre el mar exterior y a 6 km de la desembocadura es de sólo una hora (15°) para la frecuencia diurna y de unos 40 min (20°) para la frecuencia semidiurna. La coherencia para ambos casos es cercana a uno para las frecuencias diurnas y semidiurnas, observándose en el espectro cruzado el pico de mayor energía en la frecuencia diurna, y uno de mucha menor energía para la frecuencia semidiurna entre el nivel del mar en el exterior y el observado a 6 km de la desembocadura del río.

Las observaciones de nivel y de condiciones termohalinas tanto en la laguna Tilapa como en la laguna Santa Anita sugieren que la onda de marea penetra hasta estos sitios lejanos a las bocas, pero no existe intrusión de agua marina, por lo que las variaciones en temperatura y conductividad parecen estar gobernadas por intercambios de calor con la atmósfera.

d) *Influencia de variables atmosféricas en la variación de condiciones termohalinas y de nivel en sitios alejados de las bocas*

Ya que la variación de las condiciones termohalinas en sitios alejados de las bocas no es consecuencia de intrusión de agua marina, su variación podría ser explicada por un

intercambio de calor con la atmósfera, la cual también presenta una variación diurna en temperatura (figura 7, línea gris), ocurriendo los máximos de temperatura primero en la atmósfera y unas horas después en el agua. Cuando la temperatura en el agua aumenta, la conductividad se incrementa también. El agua dulce que se pierde por evaporación eleva la conductividad y la salinidad de la masa de agua. Si se toma en cuenta que el agua de mar presenta una conductividad de unos 56 mS/cm y el agua pura una conductividad prácticamente nula, el agua en la laguna Tilapa se considera salobre, presentando una conductividad media de unos 24 mS/cm, mientras que el agua en la laguna Santa Anita presenta una conductividad prácticamente nula (figura 7).

Con el fin de investigar la relación entre la temperatura atmosférica y la conductividad y temperatura en dichos sitios alejados de las desembocaduras, se calculó el espectro cruzado, coherencia y fase entre dichas variables. En la laguna Tilapa (sur de la laguna Mecoacán) se observan dos picos evidentes de correspondencia: el mayor en la frecuencia diurna y uno asociado con menor energía en la frecuencia semidiurna tanto para la temperatura como para la conductividad *versus* la temperatura atmosférica (figura 10a). La coherencia es muy cercana a uno para ambos casos en la frecuencia diurna y sólo para el caso de la temperatura en la frecuencia semidiurna. El desfase para la frecuencia diurna tanto para la temperatura como para la conductividad *versus* la temperatura atmosférica es de $\sim 75^\circ$ o 5 horas. Tanto los resultados observados en el espectro cruzado como la alta coherencia obtenida sugieren que es muy probable que las variaciones diurnas de temperatura y conductividad en este sitio estén relacionadas de manera directa con una transferencia de calor con la atmósfera, misma que ocurre en un lapso de cinco horas en este sitio.

En la zona del río González (laguna Santa Anita) se observa una clara correspondencia en la frecuencia diurna entre la temperatura

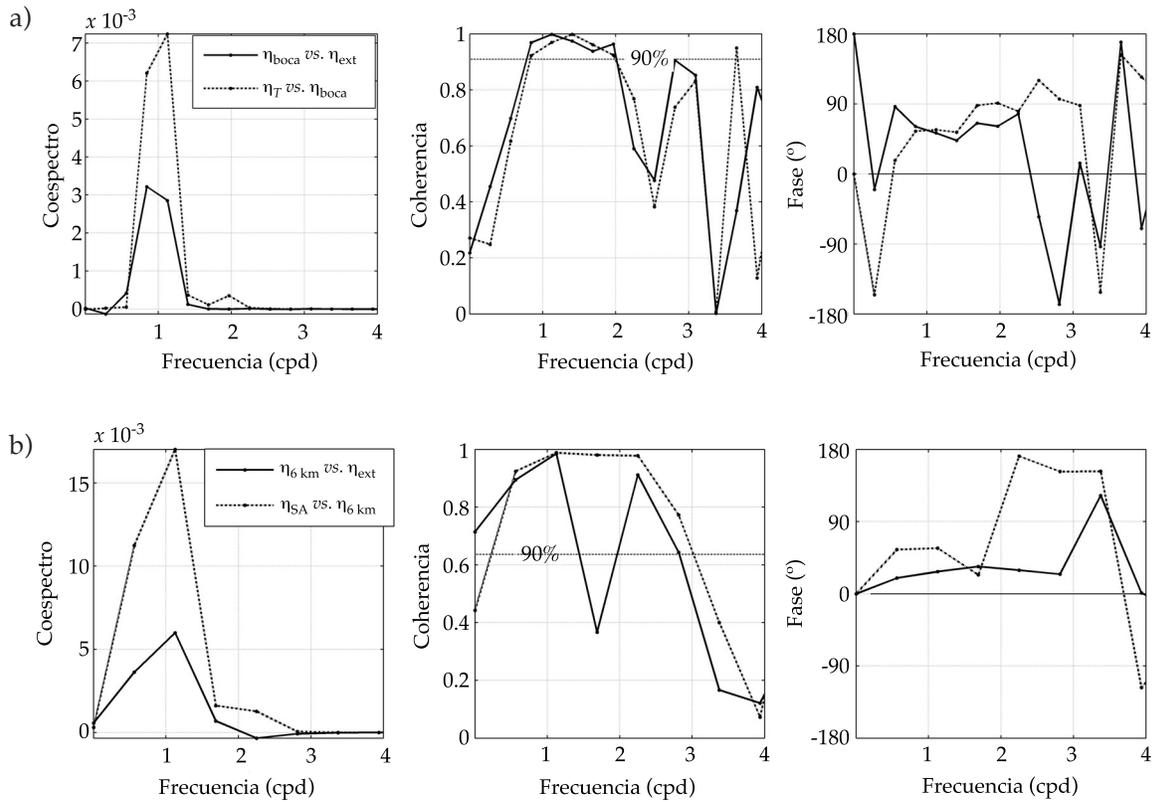


Figura 9. Coespectro, coherencia y fase entre las series temporales de variaciones de baja frecuencia de nivel en el mar exterior (η_{ext}) versus el nivel cerca de las bocas (η_{boca} , η_{6km}), y éstas últimas versus nivel lejos de las bocas (η_T , η_{SA}) en la zona de a) la laguna Mecoacán y b) el río González.

de la laguna y la temperatura atmosférica (figura 10b). La coherencia entre estas variables es muy cercana a uno para la frecuencia diaria, presentando un desfase de unos 37° o 2.5 horas. La conductividad no tiene una relación clara con la temperatura atmosférica, ya que se observa baja energía en todas las frecuencias, y la coherencia está por debajo del límite de confianza para la frecuencia diaria y semidiurna. A diferencia de la laguna Tilapa, en la laguna Santa Anita, la conductividad no se ve afectada de forma directa por la temperatura atmosférica. Ya que la salinidad es prácticamente nula en este sitio, ésta no aumentaría a pesar de que pudiera haber evaporación producto de un aumento de temperatura. Por otro lado, el desfase entre

la temperatura atmosférica y la temperatura del agua es menor en la laguna Santa Anita al observado en la laguna Tilapa. Es decir, la transferencia de calor es más rápida en el caso de la laguna Santa Anita. Esto puede deberse a que el instrumento se ancló a una profundidad menor en la laguna Santa Anita (0.6 m) que en la laguna Tilapa (1.35 m).

También se explora la relación entre la variación de nivel y la presión atmosférica (figura 7, línea gris), ya que existe el llamado efecto de barómetro inverso, el cual explica cambios en el nivel de un cuerpo de agua como resultado de variaciones en la presión atmosférica, con una relación aproximada de 1 cm por hPa (1 hPa = 1 mbar). Al comparar la variación de presión en el agua (nivel) con la

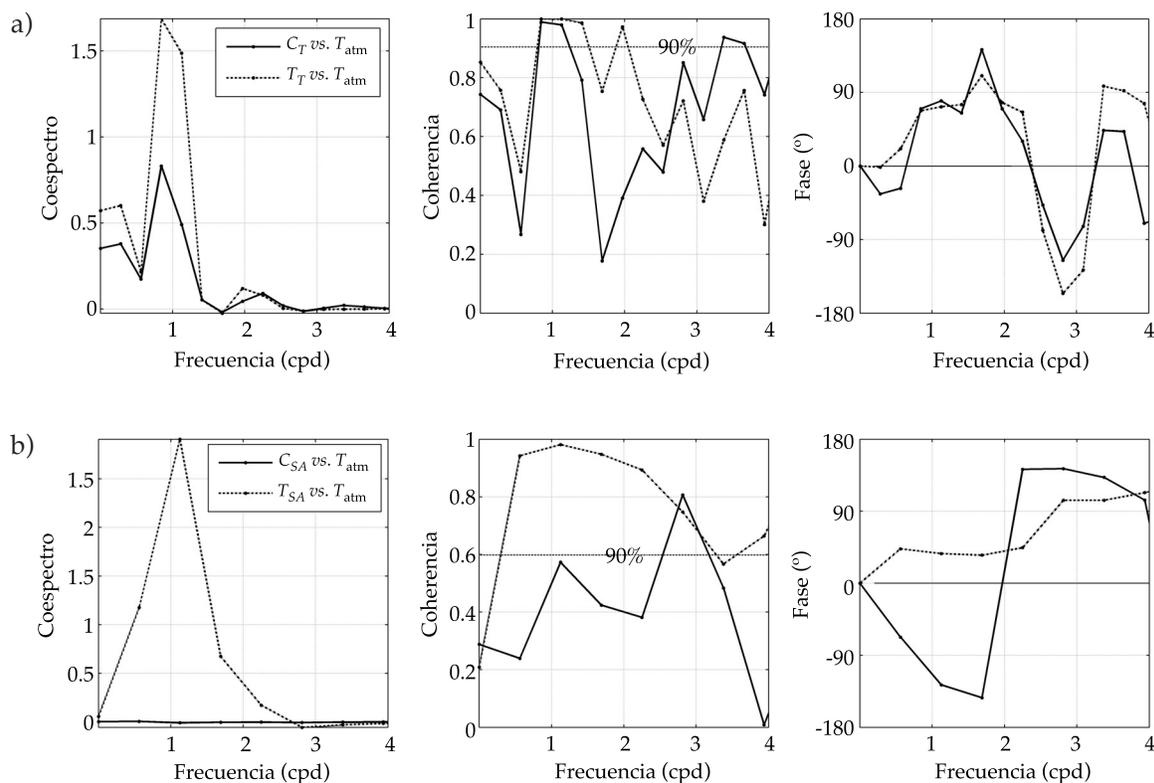


Figura 10. Coespectro, coherencia y fase entre las series temporales de variaciones de baja frecuencia de conductividad y temperatura lejos de las bocas (C_T , T_T , C_{SA} , T_{SA}) en la zona de a) la laguna Mecoacán y b) el río González.

variación de la presión atmosférica, se observa que ambas ondas se encuentran en oposición de fase, consistente con el efecto de barómetro inverso; sin embargo, hay una relación de aproximadamente 1 mbar de aumento en presión atmosférica por 2 cm de disminución de presión en el agua. Por lo tanto, los cambios de nivel no podrían ser explicados en su totalidad por alteraciones en la presión atmosférica, sino como un efecto combinado de penetración de la onda de marea y variación de la presión atmosférica. A partir del cálculo del coespectro entre la presión atmosférica y el nivel en la laguna Santa Anita (figura 12), se obtiene un pico negativo alrededor de la frecuencia diaria. Esto tiene sentido, ya que según el efecto “barómetro inverso”, al aumentar la presión atmosférica se produce

una depresión del nivel del cuerpo de agua. Por otro lado, la coherencia es cercana a 1 y el desfase cercano a 180° . Estas observaciones sugieren que es probable que en la laguna Santa Anita la presión atmosférica tenga un efecto importante sobre las variaciones de nivel. Cabe mencionar que en el caso de la laguna Tilapa no se encontró una relación directa entre los cambios de nivel y la presión atmosférica.

Por último, se investiga la influencia del viento sobre las variaciones de nivel en la laguna Santa Anita. Los datos de viento se obtuvieron a partir de una EMAS (Estación Meteorológica Automática de Superficie) de la SEMAR cercana a la zona de estudio (Coatzacoalcos, Veracruz). Es importante mencionar que el viento proviene principalmente del N y NNE, aunque existen algunos episodios de viento

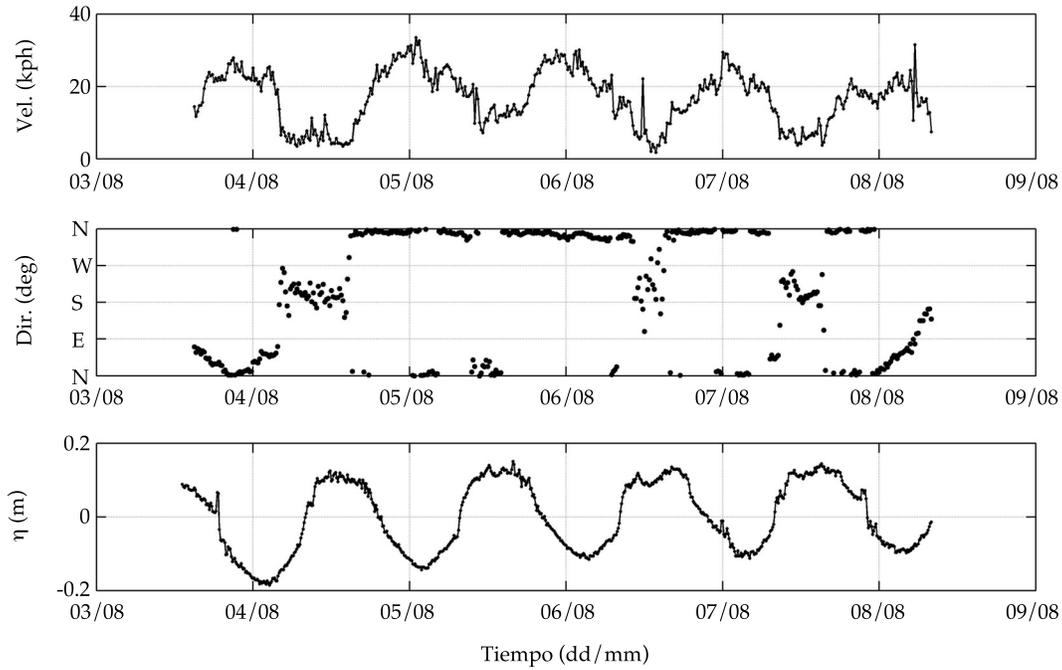


Figura 11. Series temporales de velocidad y dirección del viento observadas en la EMAS de la SEMAR en Coatzacoalcos, Veracruz, así como variación del nivel en la laguna Santa Anita (η).

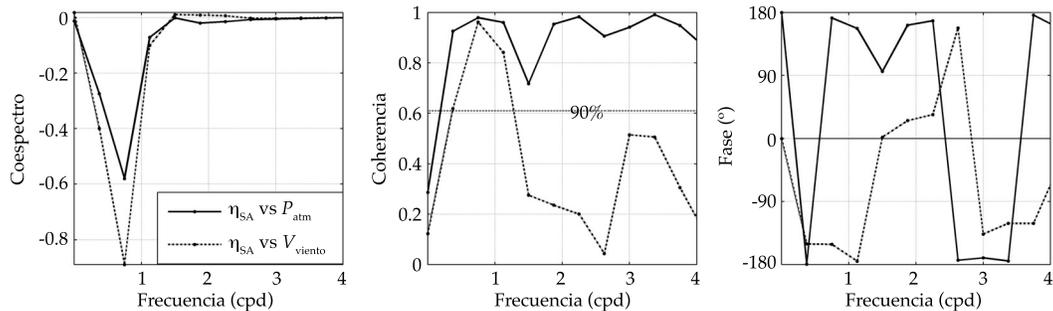


Figura 12. Coespectro, coherencia y fase entre las series temporales de variaciones de baja frecuencia (> 6 horas) de nivel en la laguna Sta. Anita (η_{SA}) versus la presión atmosférica (P_{atm}) y la velocidad del viento (V_{viento}).

que vienen del sur, pero asociados con muy baja energía (figura 11).

A partir del cálculo del coespectro entre las variaciones de baja frecuencia (1 a 4 cpd) de nivel y velocidad del viento (figura 12), se observa un pico negativo próximo a la frecuencia diurna. La coherencia en dicha frecuencia es muy cercana a uno, y el desfase

entre la velocidad del viento y el nivel es de $\sim 155^\circ$ o 10.3 horas, encontrándose casi en oposición de fase, lo que quiere decir que el máximo de velocidad de viento ocurre unas horas antes (~ 2 horas) que el mínimo de nivel. Esto podría explicarse como una depresión de nivel (*set down*) en la costa norte de laguna (lugar donde se ancló el instrumento)

provocado por un viento persistente proveniente del norte.

Lo anterior sugiere que las variaciones de nivel en la laguna Santa Anita sean producto de un efecto combinado de penetración de la onda de marea, variaciones en la presión atmosférica y viento.

Conclusiones

La marea juega un papel fundamental en la regulación de los flujos y las condiciones termohalinas en el sistema lagunar de Mecoacán y el río González. Las observaciones de intensidad y dirección de flujo permiten concluir que en la boca de la laguna Mecoacán el flujo está gobernado casi en su totalidad por la variación del nivel en el mar exterior. Asimismo, en el río Hondo, el flujo está modulado por la marea, disminuyendo de forma notable su velocidad e incluso logrando revertir la dirección del flujo en mareas vivas. Por último, las observaciones de flujo en el río González muestran que éste se encuentra también regulado por la marea, disminuyendo de manera considerable en marea alta durante mareas vivas, llegando incluso a detenerse. Estas observaciones permiten inferir las posibles consecuencias del desvío de grandes caudales hacia el río González, provenientes del río Samaria, como una de las medidas para disminuir el riesgo de inundación en la ciudad de Villahermosa. Ya que el flujo en la zona de estudio está fuertemente regulado por la marea, dependiendo de la fase en que ésta se encuentre, podría resultar en un lento drenaje del río González hacia el mar, así como hacia la laguna Mecoacán a través el río Hondo, cuyo flujo podría detenerse e incluso revertirse en dirección al río González. Lo anterior provocaría un aumento considerable del nivel en el río González, e incluso desbordamiento y riesgo de inundación en la zona. Si este fenómeno ocurriera durante un evento de tormenta, asociado con una sobre elevación del nivel del mar y por lo tanto

corrientes mareales más intensas, el efecto regulador de la marea sobre los flujos sería aún más importante.

Por otro lado, las observaciones de las condiciones termohalinas en sitios cercanos a las bocas sugieren que el grado de intrusión de agua marina al interior del sistema está modulado por la variación del nivel del mar, por lo que una sobre elevación de la marea (debida a eventos extremos) podría provocar que la intrusión de agua marina ocurra en mayor medida y hasta sitios más alejados de las desembocaduras. Por último, las evidencias de penetración de la onda de marea hasta sitios alejados de las desembocaduras sugieren que el flujo en sitios río arriba (no medido) podría también estar en cierto grado modulado por variaciones en el nivel del mar. Sin embargo, sería necesario realizar modelaciones numéricas para: a) investigar el grado de influencia de las variables atmosféricas sobre los cambios en el nivel del agua y las condiciones termohalinas en sitios alejados de las desembocaduras donde la intrusión de agua marina es insignificante, y b) simular, bajo distintos escenarios, los efectos de un aumento considerable del caudal en el río González, asociado con una posible sobre elevación del nivel del mar exterior debida a eventos extremos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Marina por haber proporcionado los datos de viento utilizados en el presente trabajo. La campaña de campo, así como la beca posdoctoral del primer autor fueron financiados por el PHIT, 2a etapa. Un agradecimiento especial al biólogo Emanuel Uc Sánchez y a la maestra en ciencias Mariana González Leija del Cinvestav-Mérida, por su participación en la planeación y el desarrollo de la campaña de campo, así como a Alberto Sosa y a los estudiantes del Instituto de Ingeniería de la UNAM: Alejandra Amaro Loza, Luis Garnica, Antonio Osegueda y Juan Pablo Rodríguez.

Recibido: 03/03/12

Aceptado: 31/07/12

Referencias

- EMERY, W.J. and THOMSON, R.E. *Data analysis methods in physical oceanography*. UK: Pergamon, 1997.
- MARENGO-MOGOLLÓN, H. y SALINAS-URIBE, O. Eventos extremos de 1999 en el sureste mexicano. Actualización del análisis hidrológico del complejo hidroeléctrico Grijalva, en Chiapas, México. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XVIII, núm. 4, 2003, pp. 87-118.
- PEDROZO-ACUÑA, A., MEDELLÍN-MAYORAL, G., RODRÍGUEZ RINCÓN, J.P., HIDALGO GARNICA, L.E., OSEGUEDA-ESCORZA, A.S., AMARO-LOZA, A., MARIÑO-TAPIA, I., ENRIQUEZ-ORTIZ, C., SOSA-HERNÁNDEZ, A. y UC-SÁNCHEZ, E. *Anexo 2 - Procesos Costeros y Sistemas Lagunares PHIT – Fase 2, Informe final de la salida de Campo*. México, D.F.: Coordinación de Hidráulica, IIUNAM, 2009.
- RIVERA-TREJO, F., SOTO-CORTÉS, G. y BARAJAS-FERNÁNDEZ, J. La inundación de 2007 en Tabasco, México: evolución de niveles de agua. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIV, núm. 4, 2009, pp. 159-166.
- THOMPSON, R.O.R.Y. Coherence significance levels. *J. Atmos. Sci.* Vol. 36, 1979, pp. 2020-2021.

Abstract

MEDELLÍN, G., MARIÑO-TAPIA, I., PEDROZO-ACUÑA, A., ENRÍQUEZ, C. & GONZÁLEZ-VILLARREAL, F. Influence of tides on the hydrodynamics of the Mecoacán-González River system, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 2, April-June, 2013, pp. 71-90.

The state of Tabasco is highly vulnerable to flooding, with the most serious in recent years occurring in 2007, covering 62% of its territory. For this reason, the Comprehensive Water Plan of Tabasco was created in order to identify solutions to diminish the vulnerability of this area to extreme events. One of the possible solutions is to divert large volumes of water to the Samaria River, which flows through the Gonzalez River into the ocean. This study analyzes the flow behavior of the Mecoacán-González River system and the role tides play in its regulation. In the Gonzalez River, the flow towards the ocean decreases significantly during high tide, and even stops during neap tides. The flow in the Hondo River (from the Gonzalez River into the Mecoacan Lagoon) can reverse itself, and in the mouth of the lagoon it is regulated by the tide. This suggests that a significant increase in water volume in the Gonzalez River would be subject to a slow flow discharge into the sea due to the effect of tidal currents, which could cause an increase in the level of the river water and present a flood risk in the area during extreme weather events. Evidence for tidal wave penetration into locations far from the river mouth suggests that the tide could also regulate the river upstream. In addition, observations of the water's physical properties indicate that temperature and salinity near the mouth depend on sea water intrusion, while distant locations depend on atmospheric factors.

Keywords: coastal flooding, Tabasco, coastal lagoon, PHIT.

Dirección institucional de los autores

Dra. Gabriela Medellín

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
(Cinvestav)
del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida
Km 6, Carretera Antigua a Progreso, Cordemex
97310 Mérida, Yucatán, MÉXICO
gmedellin@mda.cinvestav.mx

Dr. Ismael Mariño Tapia

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
(Cinvestav)
del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida
Km 6, carretera Antigua a Progreso, Cordemex
97310 Mérida, Yucatán, MÉXICO
imarino@mda.cinvestav.mx

Dr. Adrián Pedrozo Acuña

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
04510 México, D.F., MÉXICO
apedrozoa@ingen.unam.mx

Dra. Cecilia Enríquez

Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Sisal
Universidad Nacional Autónoma de México
Puerto de Abrigo s/n
97355 Sisal, Yucatán, MÉXICO
cenriqz@ciencias.unam.mx
Antes: Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
04510 México, D.F., MÉXICO

Dr. Fernando González-Villarreal

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
04510 México, D.F., MÉXICO
fgonzalezv@ingen.unam.mx