

## VARIACIONES PERIODICAS DEL NIVEL DEL MAR EN MEXICO

Costas del Golfo

Por

J. Merino y Coronado

## RESUMEN

*The seasonal, periodic variations in sea level in the Gulf Coast of Mexico are examined and its possible causes studied. The data of four years of observations (1952-1955) shows an annual cycle similar to that observed during one complete 19 year period in tide gage stations located in U. S. A. Gulf Coast west of the Mississippi River, due to "long period meteorological tides".*

*It is found that there are several causes for such long period tides: variations in atmospheric pressure, air and water temperature, density of sea water and rainfall. Winds have but little effect.*

*It is shown that the main factor which produces the periodic changes in sea level is the density of sea water, which, in turn, is determined by the salinity. As salinity varies with rainfall, and as density is affected by temperature, these two factors are ultimately responsible for the observed periodic changes in sea level in the Mexican Gulf Coast.*

*El nivel medio del mar, durante un lapso dado se define como el promedio de todas las alturas horarias del mar durante ese intervalo de tiempo, sin aplicarse corrección alguna.*

En México obtenemos dicho nivel a partir de los registros dados por mareógrafos del tipo "Standard" de la oficina Norteamericana U. S. Coast and Geodetic Survey.

Con el promedio de las alturas horarias de la marea desde las 0 horas hasta las 23 horas de cada día, se obtiene el "nivel medio diario". El promedio de todas las alturas horarias durante un mes nos da el "nivel medio mensual" y el promedio de todas las alturas horarias durante un año nos da el "nivel medio anual".

Ya en 1927 Marmer hizo notar que los valores del nivel medio mensual del mar experimentan un ciclo anual. LaFond hace notar que en San Francisco el ciclo de las variaciones es semi-anual, mientras que en La Jolla, Los Angeles y San Diego, las variaciones del nivel medio mensual siguen un ciclo prácticamente anual.

Usualmente los oceanógrafos describen las variaciones estacionales del nivel medio del mar como "mareas meteorológicas de largo período". Harris en 1907 y Shureman en 1924 indicaron que estas variaciones son debidas principalmente a cambios meteorológicos periódicos y que las causas astronómicas productoras de mareas tienen muy poco que ver con los ciclos anuales o semi-anuales del nivel medio del mar.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, no nos hemos preocupado todavía por analizar las causas astronómicas de las variaciones anuales del nivel medio del mar cuando se trata de ciclos anuales o semianuales observados en nuestras estaciones, ya que es fácil demostrar que la magnitud de las variaciones producidas por los cuerpos celestes en el nivel medio del mar, cuando se trata de ciclos definidos de largo período, es prácticamente despreciable.

Hace algunos años era frecuente afirmar que las "mareas meteorológicas" se debían principalmente a cambios en la presión atmosférica y a variaciones en la intensidad y dirección del viento. Sin negar la poderosa influencia que estos dos factores tienen en las llamadas "mareas meteorológicas", sabemos hoy que muchas grandes variaciones cíclicas del nivel medio del mar observadas en nuestras costas, se deben en gran parte a cambios periódicos en la densidad del agua,

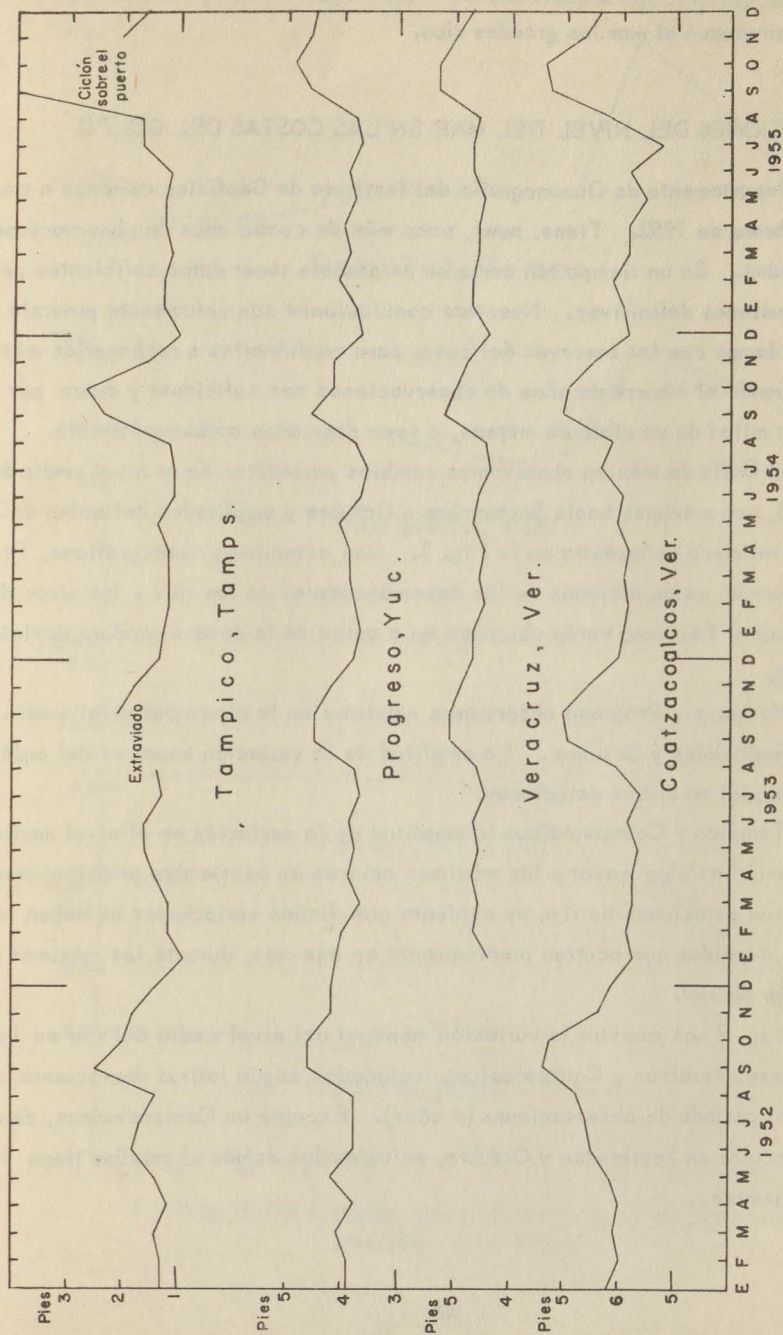


Fig 1 Nivel medio del mar, variación mensual y ciclo anual

densidad que varía por las grandes inyecciones de agua dulce que, en tiempos de avenidas, introducen al mar los grandes ríos.

## VARIACIONES DEL NIVEL DEL MAR EN LAS COSTAS DEL GOLFO

El Departamento de Oceanografía del Instituto de Geofísica comenzó a trabajar en Febrero de 1952. Tiene, pues, poco más de cuatro años de observaciones ininterrumpidas. En un tiempo tan corto no es posible tener datos suficientes para sacar conclusiones definitivas. Nuestras conclusiones son únicamente provisionales y las damos con las reservas del caso, para confirmarlas o rechazarlas más adelante, cuando el número de años de observaciones sea suficiente y cubra por lo menos la mitad de un ciclo de mareas, o sean diez años aproximadamente.

En el Golfo de México observamos cambios periódicos en el nivel medio del mar mensual, con máximos hacia Septiembre u Octubre y amplitudes del orden de 30 cm (un pie) tal como se muestra en la Fig. 1. Dos estaciones mareográficas, Progreso y Veracruz, están alejadas de las desembocaduras de los ríos y las otras dos Coatzacoalcos y Tampico, están ubicadas en o cerca de la desembocadura de ríos y aguas arriba.

En Veracruz y Progreso observamos máximos en la altura del nivel medio del mar en Septiembre y Octubre. La amplitud de la variación anual es del orden de 30 cm (un pie) en ambas estaciones.

En Tampico y Coatzacoalcos la amplitud de la variación en el nivel medio del mar mensual es algo mayor y los máximos ocurren en Septiembre principalmente. Como son estaciones de río, es evidente que dichas variaciones se deben a las grandes avenidas que ocurren precisamente en ese mes, durante los máximos de precipitación pluvial.

La Fig. 2 nos muestra la variación mensual del nivel medio del mar en Tampico, Progreso, Veracruz y Coatzacoalcos, colocadas según latitud decreciente, durante todo el período de observaciones (4 años). Excepto en Coatzacoalcos, donde el máximo ocurre en Septiembre y Octubre, en todas las demás el máximo tiene lugar en Septiembre.

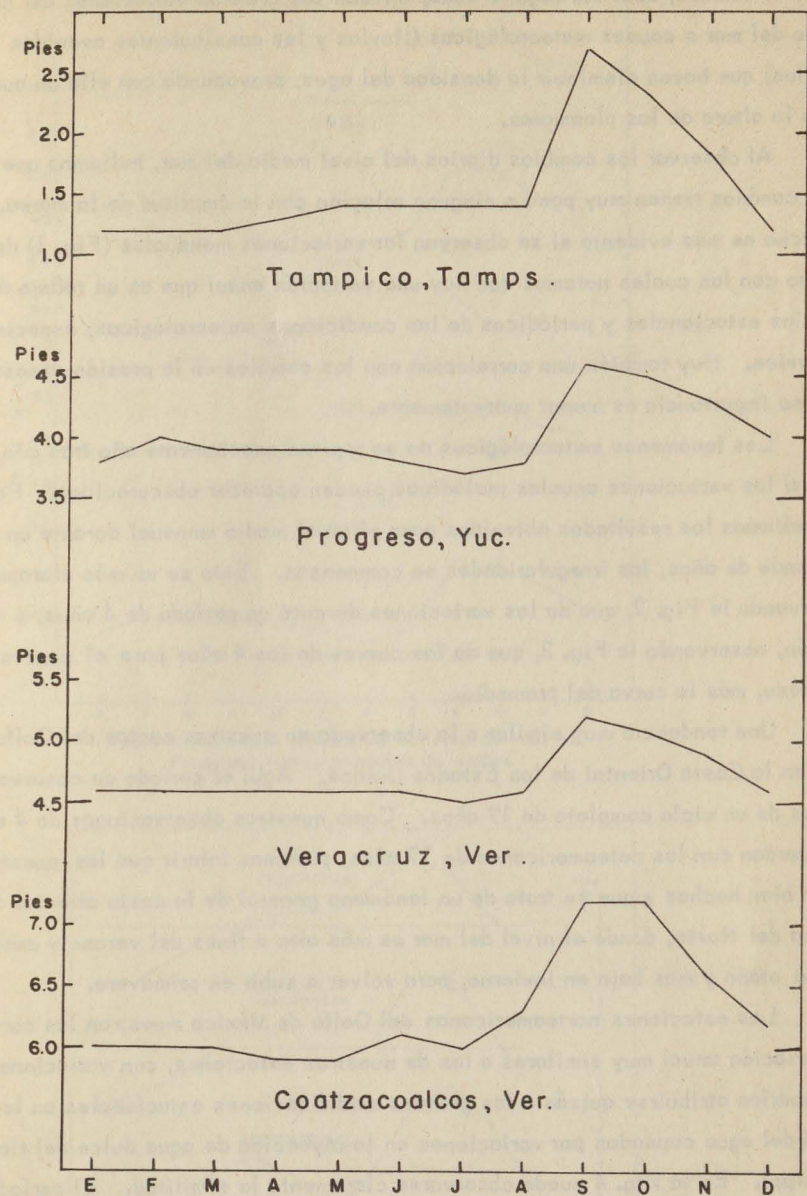


Fig. 2 Nivel medio del mar, variación mensual, promedio de 4 años

Podemos, casi sin lugar a duda, atribuir las grandes variaciones del nivel medio del mar a causas meteorológicas (lluvias y las consiguientes avenidas de los ríos) que hacen disminuir la densidad del agua, provocando con ello un aumento en la altura de las pleamares.

Al observar los cambios diarios del nivel medio del mar, hallamos que dichos cambios tienen muy poca o ninguna relación con la amplitud de la marea. Este hecho es más evidente si se observan las variaciones mensuales (Fig. 1) de acuerdo con las cuales notamos que hay una *variación anual* que es un reflejo de los cambios estacionales y periódicos de las condiciones meteorológicas, especialmente lluvias. Hay también una correlación con los cambios en la presión atmosférica pero su importancia es menor aparentemente.

Los fenómenos meteorológicos no se repiten exactamente año tras año, con lo cual las variaciones anuales periódicas pueden aparecer oscurecidas. Pero si promediamos los resultados obtenidos para el nivel medio mensual durante un número grande de años, las irregularidades se compensan. Esto se ve más claramente observando la Fig. 2, que da las variaciones durante un período de 4 años, o mejor aún, observando la Fig. 3, que da las curvas de los 4 años para el puerto de Progreso, más la curva del promedio.

Una tendencia muy similar a la observada en nuestras costas del Golfo, se nota en la Costa Oriental de los Estados Unidos. Aquí el período de observaciones es de un ciclo completo de 19 años. Como nuestras observaciones de 4 años concuerdan con las norteamericanas de 19 años, podemos inferir que las nuestras están bien hechas y que se trata de un fenómeno general de la costa oriental de América del Norte, donde el nivel del mar es más alto a fines del verano y principio de otoño y más bajo en invierno, para volver a subir en primavera.

Las estaciones norteamericanas del Golfo de México muestran las curvas de variación anual muy similares a las de nuestras estaciones, con variaciones que podrían atribuirse quizás a las grandes modificaciones estacionales en la densidad del agua causadas por variaciones en la inyección de agua dulce del río Mississippi. En la Fig. 4 puede observarse claramente la similitud. El período cubierto por las observaciones estadounidenses es de 19 años.

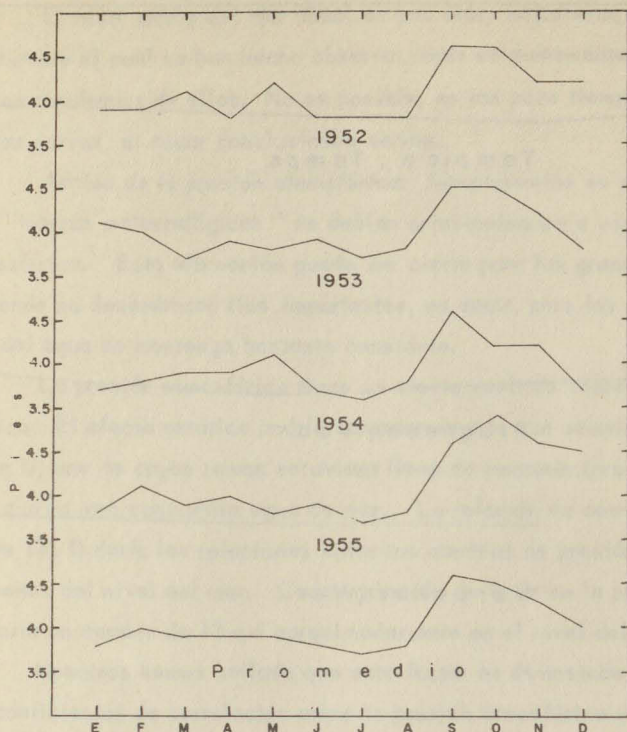


Fig.3 Variaciones mensuales del nivel del mar en Progreso, Yuc., y promedio de 4 años

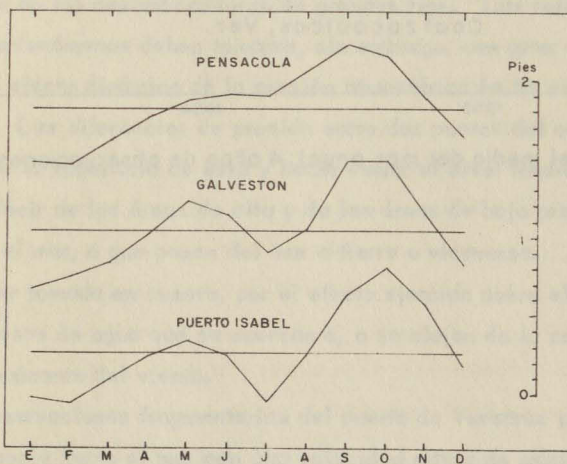


Fig. 4 Variaciones del nivel del mar. Costa del Golfo en los Estados Unidos.

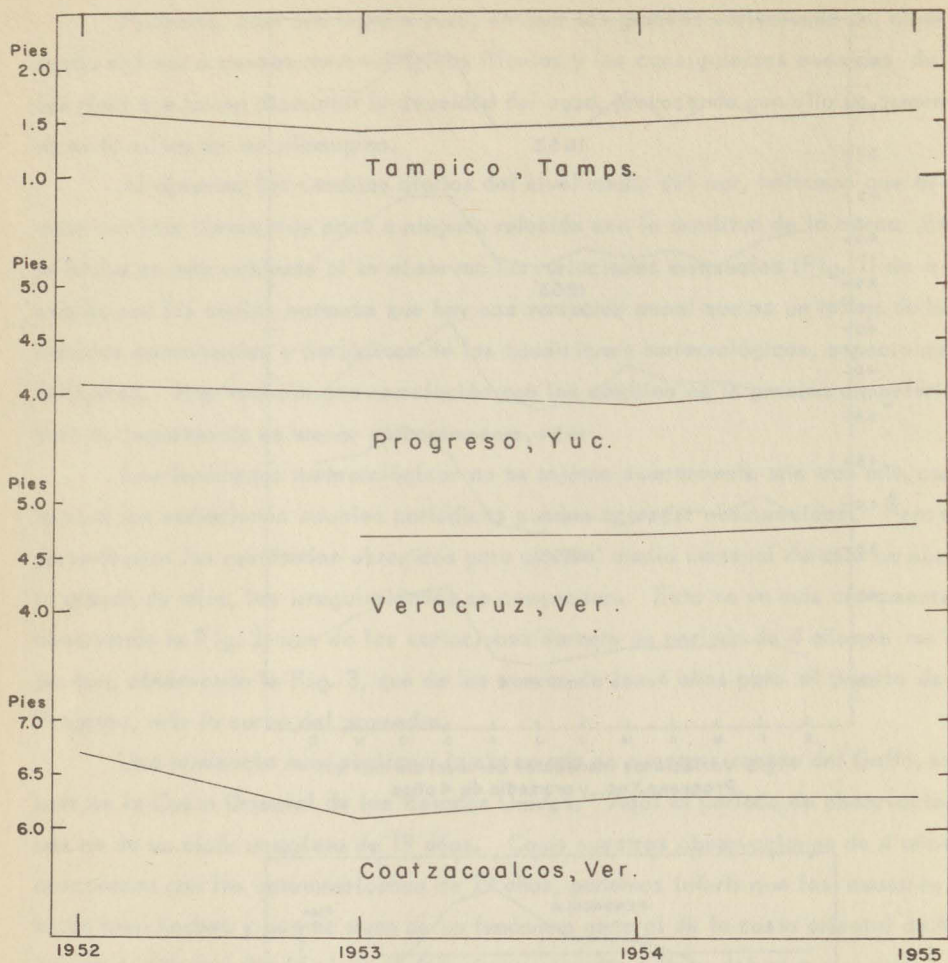


Fig.5 Nivel medio del mar anual: 4 años de observaciones

El nivel medio del mar anual no nos dice, en cambio, gran cosa. El período durante el cual se han hecho observaciones es sumamente pequeño. La Fig. 5 da los resultados de ellas, No es posible, en tan poco tiempo, notar las tendencias de las curvas, ni sacar conclusiones serias.

*Acción de la presión atmosférica:* Anteriormente se supuso que las llamadas "mareas meteorológicas" se debían principalmente a variaciones en la presión atmosférica. Esta afirmación puede ser cierta para las grandes extensiones de costa donde no desembocan ríos importantes, es decir, para las costas donde la densidad del agua se mantenga bastante constante.

La presión atmosférica tiene un efecto estático sobre el mar y un efecto dinámico: El efecto estático podría compararse a lo que ocurriría en un tubo doblado en U, una de cuyas ramas estuviera llena de mercurio (presión atmosférica) mientras que la otra contuviera agua de mar. La relación de densidades (aproximadamente 13:1) daría las relaciones entre los cambios de presión barométrica y las variaciones del nivel del mar. Cada variación de 1 mm en la presión atmosférica ocasionaría un cambio de 13 mm aproximadamente en el nivel del mar.

Nosotros hemos hallado que este factor es demasiado grande. Sin embargo, los coeficientes de correlación entre la presión atmosférica y el nivel medio del mar son bastante altos para no ser tomados en cuenta. La Fig. 6 da el nivel medio del mar mensual y la presión media mensual en Progreso, Yuc., puerto que se encuentra alejado de las desembocaduras de grandes ríos. Las relaciones aparentes entre los dos-fenómenos deben tomarse, sin embargo, con gran cautela.

El efecto dinámico de la presión atmosférica no ha sido estudiado aún por nosotros. Las diferencias de presión entre dos puntos del océano pueden modificar la forma de la superficie de éste y hacer variar el nivel medio del mar. Lo mismo podemos decir de las áreas de alta y de las áreas de baja presión que se desplazan sobre el mar, o que pasan del mar a tierra o viceversa. Aquí la acción del viento ha de ser tomada en cuenta, por el efecto ejercido sobre el desplazamiento de grandes masas de agua que se acercan a, o se alejan de la costa, según la dirección predominante del viento.

Observaciones fragmentarias del puerto de Veracruz parecen indicar que si el viento sopla hacia el mar con una velocidad mayor de unos 4 m/seg (unos 14.4 km/h) el nivel medio del mar bajará el día que tal fenómeno ocurra. Sin embargo,

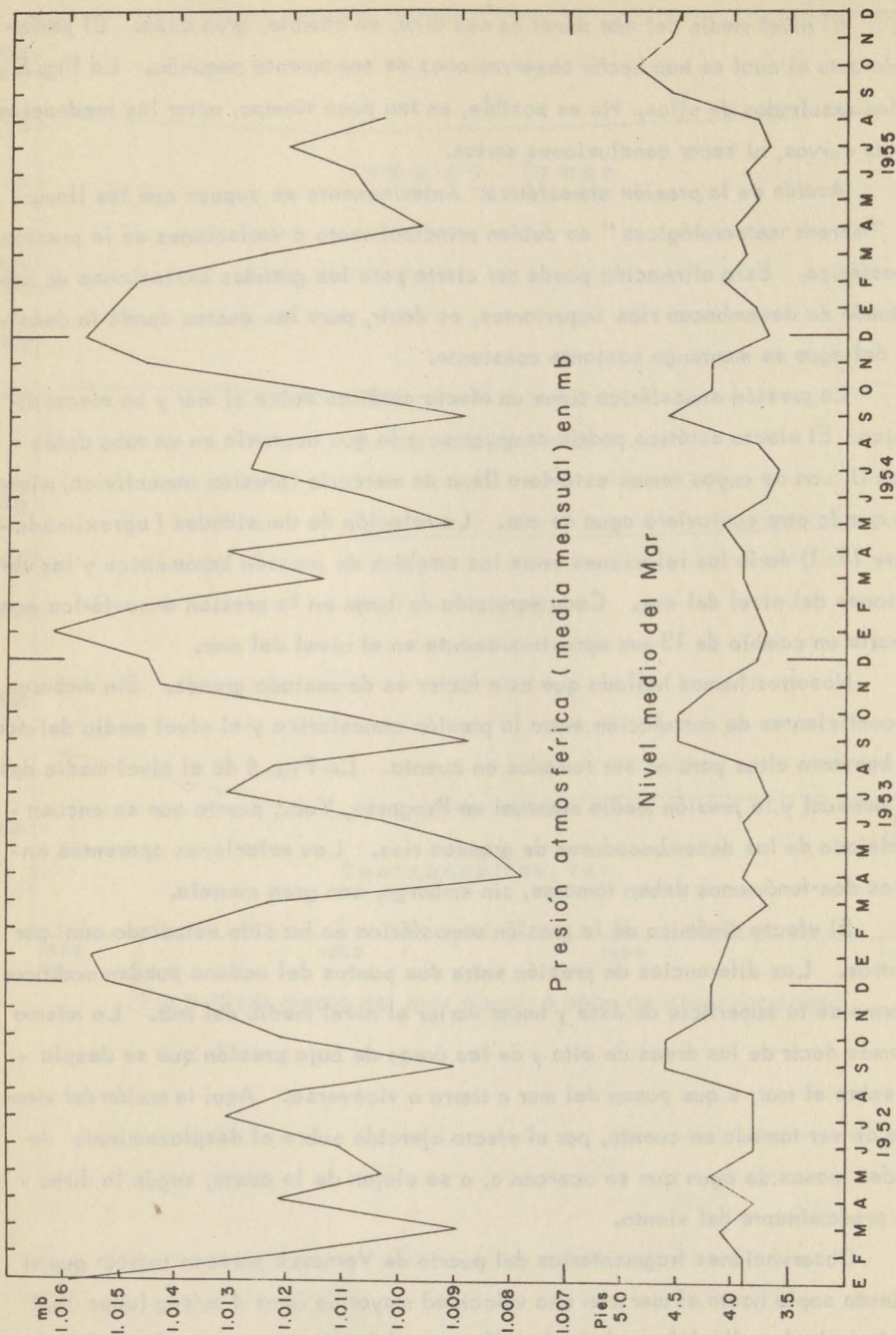


Fig.6 Relaciones entre la presión atmosférica media y el nivel medio del mar en Progreso, Yuc.

no hemos determinado en qué proporción. La complejidad del fenómeno y las pocas observaciones de que disponemos nos impiden llevar más adelante nuestra afirmación.

En todo caso, se puede establecer teóricamente que la elevación del nivel del mar debida al paso de un centro de baja presión que se desplaza puede expresarse con gran aproximación por la ecuación siguiente:

$$y = \frac{13 (760 - P)}{1 - \frac{v^2}{gh}}$$

donde

y es la elevación de la superficie del mar en mm ;

P es la presión atmosférica del centro de la perturbación, en mm;

h la profundidad media del agua, en m ;

g es la aceleración de la gravedad en m/seg<sup>2</sup> y

v la velocidad de desplazamiento de la perturbación en m/seg.

La fórmula indica que cuando v se acerca al valor  $\sqrt{gh}$  que nos da la velocidad de propagación de una oscilación libre, la elevación del nivel del mar puede alcanzar valores muy superiores a los que daría el simple efecto estático de vasos comunicantes.

Cuando tratamos de correlacionar la presión atmosférica con el nivel medio del mar en las vecindades de las desembocaduras de grandes ríos, los coeficientes de correlación ya no son tan altos, tal como puede observarse por simple inspección de la Fig. 7, que nos da la presión atmosférica media mensual y el nivel medio mensual del mar en el puerto de Coatzacoalcos, Ver. En los puntos marcados A, B, C, D en la figura (y en otros muchos, por lo demás) las faltas de correlación entre los dos fenómenos son evidentes aún sin hacer ningún trabajo estadístico.

En consecuencia y como resultado del estudio de nuestras observaciones, podemos afirmar que en nuestras costas del Golfo las "mareas meteorológicas" de largo período se deben principalmente, al menos para los puertos de Tampico, Veracruz, Alvarado, Coatzacoalcos y Ciudad del Carmen, a causas distintas de la pre-

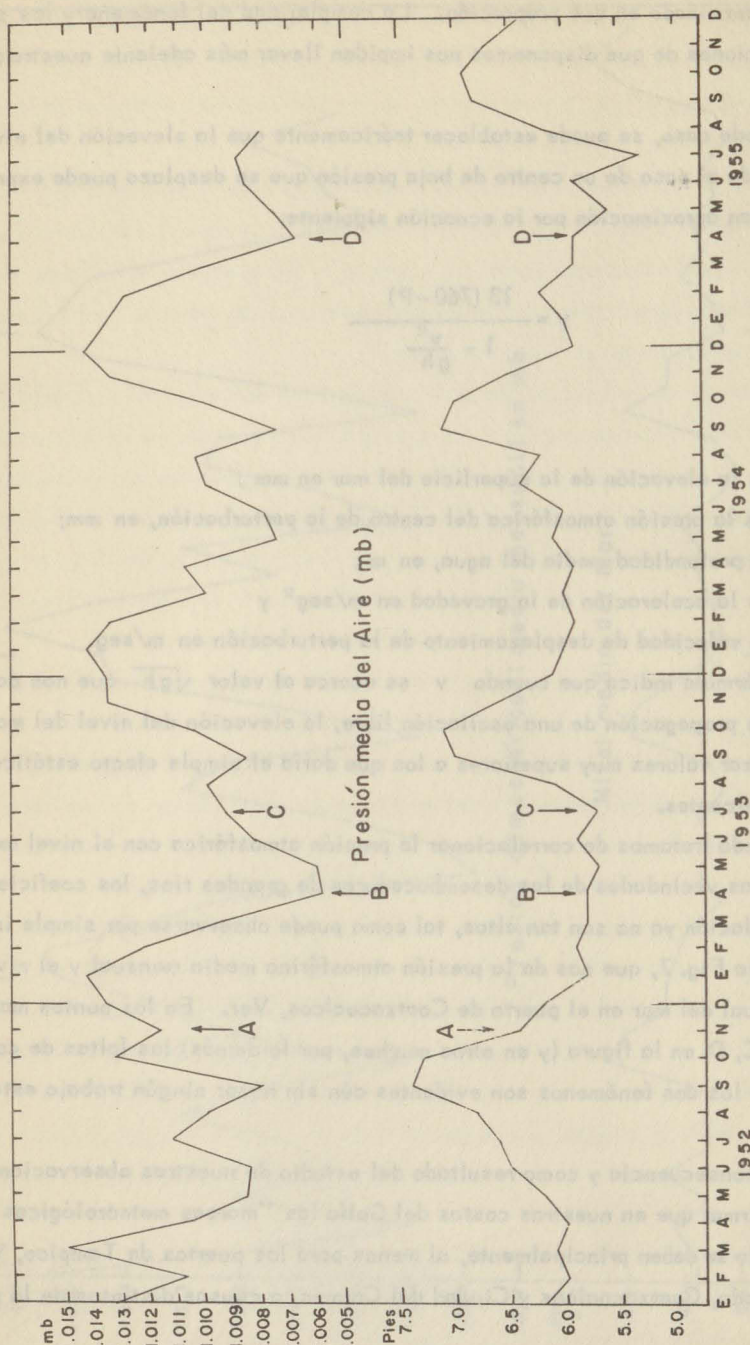


Fig.7 Presión media mensual y nivel medio del mar en Coatzacoalcos,Ver.

sión atmosférica. Al menos dos tercios de la variación anual pueden atribuirse a causas que discutiremos en los párrafos que siguen.

**Variaciones periódicas de la densidad del agua:** Las variaciones periódicas que experimenta el nivel medio del mar en las costas del Golfo pueden atribuirse en su mayor parte a variaciones en la densidad del agua, más bien que a cambios en la presión atmosférica. Hemos encontrado que, para nuestras costas del Golfo, las variaciones periódicas del nivel medio del mar se deben principalmente a variaciones de densidad. En efecto, poco más de  $2/3$  de la amplitud del fenómeno puede atribuirse a esta causa.

Las variaciones de densidad no son una causa, sino más bien el efecto de varias causas que, combinadas, dan por resultado el fenómeno que nos ocupa.

Las causas de variación de densidad más evidentes se discuten en las líneas que siguen.

**Temperatura:** Debido a su gran calor específico, el agua del mar conserva su temperatura durante algún tiempo, tanto cuando ésta es superior a la del aire, como cuando es inferior. Es decir, que el calentamiento del mar durante los meses del verano, lo mismo que su enfriamiento durante los meses de fríos, se efectúa con cierto retraso respecto a la temperatura del aire. Los grandes fenómenos meteorológicos (nortes o ciclones) no tienen gran influencia sobre la temperatura del agua del mar, a menos que su duración se prolongue mucho tiempo.

Por esta razón tomamos las temperaturas *media mensual* cuando se trata de estudiar las variaciones de densidad del agua del mar. Así tomadas, las gráficas de las temperaturas del aire y del agua del mar ofrecen tal semejanza, que son prácticamente intercambiables, pues casi se puede pasar siempre de una a la otra mediante una simple corrección aditiva o subtractiva. Esto es tanto más importante, cuanto que algunas de las medidas de temperatura que se llevan a cabo en nuestras estaciones mareográficas valen muy poco y deben tomarse con ciertas reservas.

En todo caso, las medidas de la temperatura del aire no son nunca las de nuestras estaciones mareográficas (que hacen una observación al día y usan termómetros de alcohol de mala calidad) sino las de los observatorios meteorológicos que mantiene el Servicio Meteorológico Nacional en el puerto respectivo.

Puede hacerse con razón la crítica de que, con una sola observación diaria, la temperatura del agua del mar no es representativa. Dicha crítica es correcta, pero afortunadamente, debido al alto calor específico del agua del mar, la temperatura de la misma varía realmente poco durante un día y el error cometido al hacer un primer estudio y en primera aproximación, no es muy grande.

Las correlaciones entre temperatura del agua (o mejor aún, del aire) la densidad y el nivel medio del mar, son lo suficientemente altas para no ignorar la interdependencia de dichos fenómenos.

La Fig. 8 ilustra la correlación entre temperatura media mensual del mar, temperatura media mensual del aire, densidad media del agua y nivel medio del mar en el puerto de Progreso Yuc.

**Precipitación pluvial:** No presentándose el fenómeno de nieve en nuestras costas del Golfo, las únicas grandes variaciones en la inyección de agua dulce al mar son debidas a las lluvias, pues carecemos de ríos que aumenten su gasto debido a los deshielos de primavera.

El estudio de la influencia de la precipitación diaria o semanal es muy difícil, ya que muchos de los fenómenos meteorológicos que aumentan la precipitación son producidos o van acompañados por cambios apreciables de la presión atmosférica. Sin embargo, hemos observado que las lluvias del orden de unos 30 mm o menos en 10 días, no muestran una correlación apreciable con los cambios en el nivel medio del mar.

Usualmente observamos en las costas del Golfo dos máximos de lluvia: Uno hacia Junio y el otro hacia Septiembre. Las aguas de escurrimiento, recogidas en las cuencas de los ríos, van a dar al mar y, unidas a las de la lluvia que cae directamente sobre el océano, provocan una disminución apreciable de la salinidad y la densidad, por simple mezcla. Se observa entonces en la salinidad una disminución después del primer máximo de lluvias, con un retraso de dos a cuatro semanas. Luego la salinidad aumenta al disminuir la lluvia, para bajar más tarde, después de que ocurre el segundo máximo de precipitación, produciéndose así dos mínimos de salinidad separados por un pequeño máximo secundario, o por lo menos un marcado cambio de pendiente en la curva de la salinidad. Cuando la precipitación es anormalmente alta, ocurre solamente un mínimo. Las variaciones en el nivel del

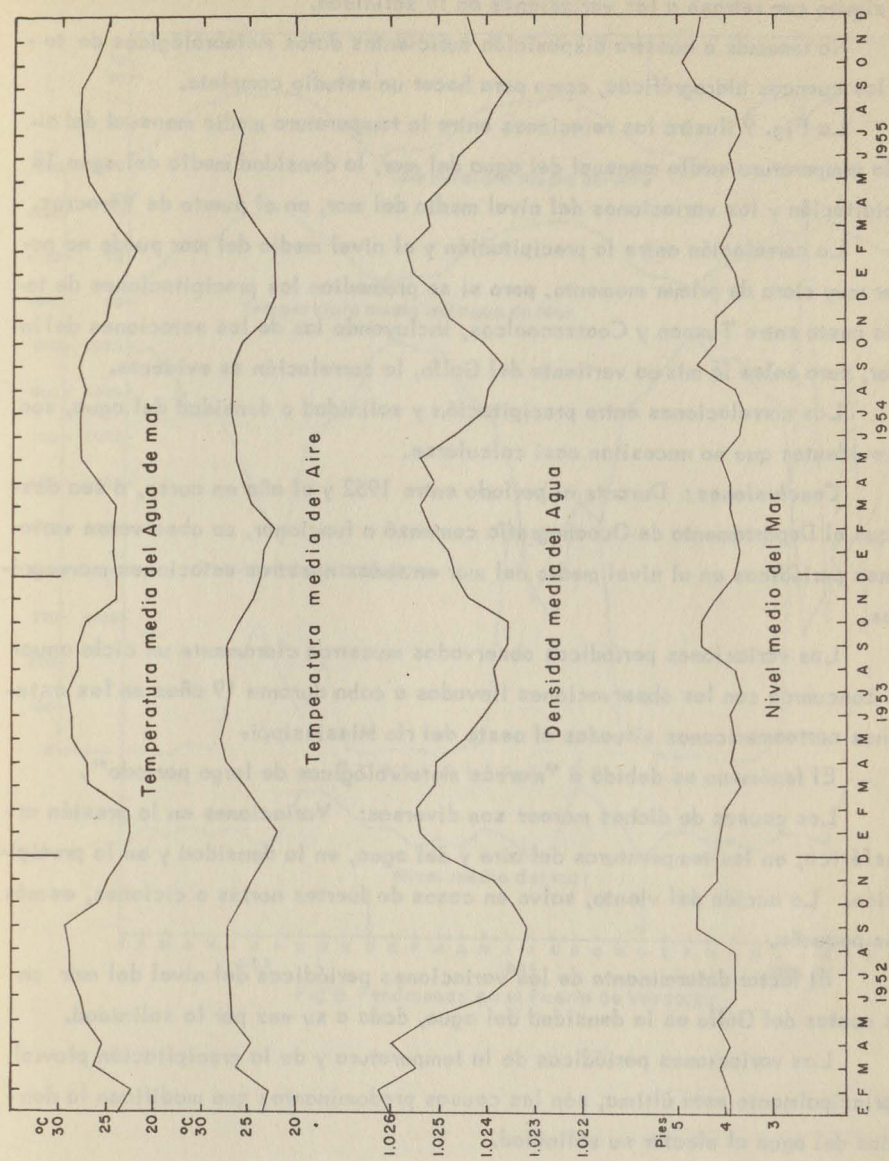


Fig. 8 Relación entre temperaturas medias, densidad y nivel medio del mar en Progreso, Yuc.

mar siguen con retraso a las variaciones en la salinidad.

No tenemos a nuestra disposición suficientes datos meteorológicos de todas las cuencas hidrográficas, como para hacer un estudio completo.

La Fig. 9 ilustra las relaciones entre la temperatura media mensual del aire, la temperatura media mensual del agua del mar, la densidad media del agua, la precipitación y las variaciones del nivel medio del mar, en el puerto de Veracruz.

La correlación entre la precipitación y el nivel medio del mar puede no parecer muy clara de primer momento, pero si se promedian las precipitaciones de toda la costa entre Tuxpan y Coatzacoalcos, incluyendo las de las estaciones del interior, pero sobre la misma vertiente del Golfo, la correlación es evidente.

Las correlaciones entre precipitación y salinidad o densidad del agua, son tan evidentes que no necesitan casi calcularse.

**Conclusiones:** Durante el período entre 1952 y el año en curso, o sea desde que el Departamento de Oceanografía comenzó a funcionar, se observaron variaciones periódicas en el nivel medio del mar en todas nuestras estaciones mareográficas.

Las variaciones periódicas observadas muestran claramente un ciclo anual que concuerda con las observaciones llevadas a cabo durante 19 años en las estaciones norteamericanas situadas al oeste del río Mississippi.

El fenómeno es debido a "mareas meteorológicas de largo período".

Las causas de dichas mareas son diversas: Variaciones en la presión atmosférica, en las temperaturas del aire y del agua, en la densidad y en la precipitación. La acción del viento, salvo en casos de fuertes nortes o ciclones, es más bien pequeña.

El factor determinante de las variaciones periódicas del nivel del mar en las costas del Golfo es la densidad del agua, dada a su vez por la salinidad.

Las variaciones periódicas de la temperatura y de la precipitación pluvial y principalmente esta última, son las causas predominantes que modifican la densidad del agua al afectar su salinidad.

El poco tiempo que tiene de trabajar el Departamento de Oceanografía hace necesario advertir que las conclusiones anteriores no son definitivas y que deben tomarse como una primera aproximación sujeta a confirmación posterior, o a una posterior modificación.

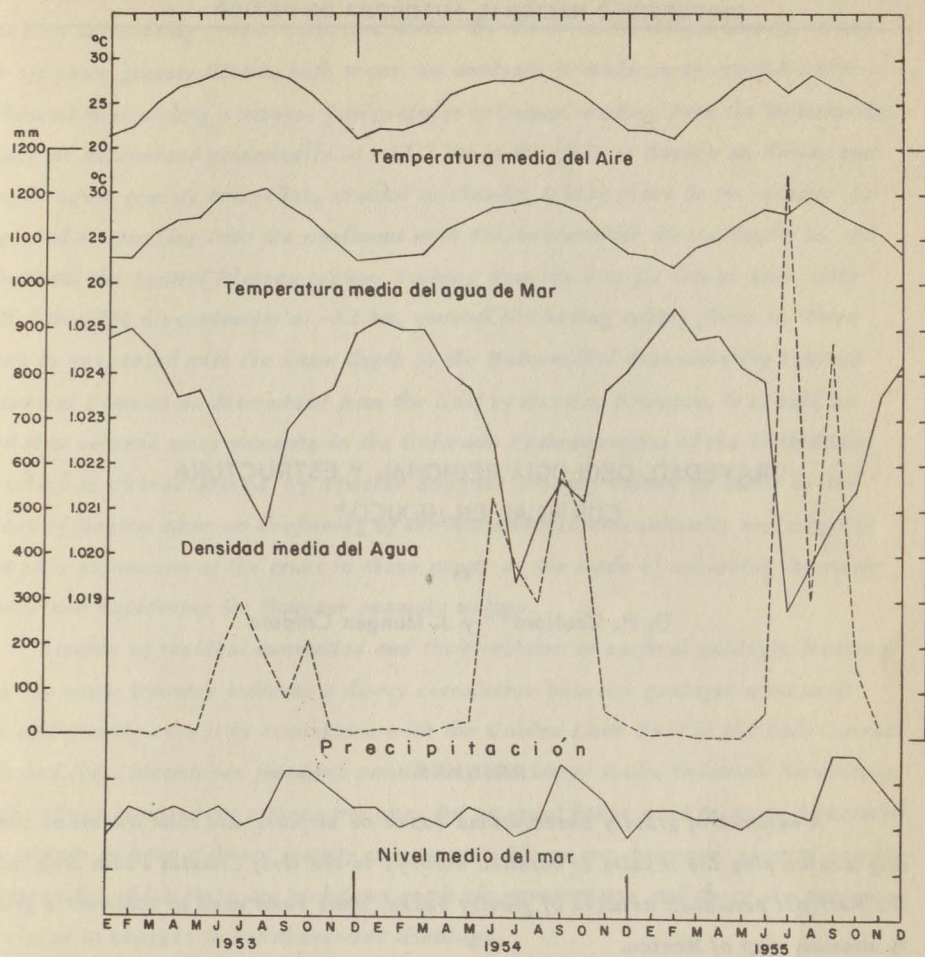


Fig. 9 Fenómenos en el Puerto de Veracruz