

PREDICCIÓN DEL EVENTO EL NIÑO 97-98 EN EL MAR ECUATORIANO USANDO MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Por:

R. Martínez G., E. Zambrano Q. y J. Garcés V.¹

ABSTRACT

Using times series of daily averages of sea level during years of occurrence of events El Niño in the station of La Libertad (02°15'S-81°27'W), techniques of spectral analysis were applied to determine the existence correlation between the last events and the first semester of 1997. Significant levels of coherence were obtained among the event El Niño 1982-1983 with the event of 1997. The comparative spectral analysis allowed to obtain the predominant waves, the amplitude and the angle of phase of each one of them. With this parameters and applying the Fourier series, a sea level serie was generated and allowed to predict the behavior of the sea level in La Libertad since July 1997 until March 1998 with a correlation of 73 %. The method was acceptable to indicate with a close approach the dynamic behavior of the warm event when the absolute values of sea level had a bigger margin of error. The narrow relationship was evidenced among the dynamic and thermal behavior of the ocean during the development of an event El Niño. The analysis of the spectra evidenced the important contribution of energy of the intraseasonal waves in the ocean. It suggest that the events El Niño have interaction patterns of the oceanic waves that would be recurrent and there fore predictable

RESUMEN

Usando series de tiempo de promedios diarios de nivel del mar en años caracterizados por la ocurrencia de eventos El Niño en la estación mareográfica de La Libertad (02°15'S-81°27'W), se aplicaron las técnicas del análisis espectral para determinar la correlación existente entre los eventos pasados y el primer semestre de 1997. Se obtuvieron niveles significativos de coherencia entre el evento El Niño 1982-1983 con el evento del 1997. El análisis espectral comparativo permitió obtener las ondas predominantes, la amplitud y el ángulo de fase de cada una de ellas. Con estos parámetros y aplicando la serie de Fourier, se generó una serie del nivel del mar que permitió predecir el comportamiento del nivel del mar en La Libertad desde julio 97 hasta marzo 98 con un 73% de correlación. El método fue óptimo para indicar con buena aproximación el comportamiento dinámico del evento cálido aún cuando los valores absolutos de nivel del mar tuvieron un margen mayor de error. Se evidenció la estrecha relación entre el comportamiento dinámico y térmico del océano durante el desarrollo de un evento El Niño. El análisis de los espectros evidenció el importante aporte de energía de las ondas interestacionales en el océano y sugiere que los eventos El Niño tienen patrones de interacción de las ondas oceánicas que podrían ser de naturaleza recurrente y por lo tanto predecibles a partir de datos históricos disponibles.

Palabras Claves:

Análisis espectral: Técnica para convertir una serie de tiempo al dominio de la frecuencia, lo que permite descomponer una señal en ondas de distinta frecuencia y amplitud.

Coherencia: Equivalente a la correlación estadística pero aplicada a dos espectros que se comparan.

INTRODUCCIÓN

Aún cuando la evolución global del evento El Niño es cada día más accesible, en muchas ocasiones las proyecciones globales, no proveen el detalle o la resolución requeridas a escala local. De hecho la grilla empleada en los modelos dinámicos globales es bastante gruesa tomando en cuenta que países como

Ecuador de territorio relativamente pequeño y su mar podrían resolverse en apenas pocos segmentos de la grilla del modelo. Por otro lado las climatologías más usadas como la de Reynolds, 1982 o Levitus, 1994 no reflejan totalmente la realidad existente en áreas aledañas a la costa. Estas limitaciones cobran vital importancia en el momento en que el evento El Niño comienza su desarrollo y lo que es peor cuando los

¹ Instituto Oceanográfico de la Armada, INOCAR. Avda. 25 de julio Base Naval Sur, casilla 5940 Guayaquil - Ecuador. Fax (5934)485166. E-Mail: cdmbac@inocar.mil.ec, eduardozambrano@hotmail.com, jgarces@mixmail.com

valores manejados de temperatura superficial del mar (TSM) o nivel medio del mar (NMM) alcanzan niveles críticos con consecuencias inmediatas y generalmente nefastas para las distintas poblaciones del Ecuador.

Pese a que el Ecuador tiene una extensión relativamente pequeña con relación a la escala de desarrollo de El Niño, son significativas las diferencias a escala local, en cuanto a niveles de precipitación, olas e incrementos del nivel medio del mar en las distintas zonas del país (Atlas Meteorológico de la Costa Ecuatoriana, 1991).

Ante estos inconvenientes y ante la falta de disponibilidad de modelos dinámicos a escala local, se impuso la necesidad de explotar la base de datos local en el ámbito oceanográfico y trabajar esta información con metodologías alternativas, accesibles y congruentes para presentar respuestas a los diferentes sectores de la sociedad. En el presente artículo se documenta esta metodología en la que se acoplan la concepción física del evento El Niño con las capacidades de la estadística y el análisis espectral.

En el mar ecuatoriano se han efectuado varias investigaciones relacionadas con la identificación de ondas oceánicas y su comportamiento durante la ocurrencia de El Niño. Se encontró que en los registros de nivel del mar en varias estaciones de Colombia, Ecuador y Perú, existió un incremento de energía en El Niño 1982-1983 muy evidente en todas las frecuencias (Cornejo y Enfield, 1987). Igualmente en la región ecuatorial se han determinado ondas ecuatoriales inercia-gravedad (Wunsch y Gill, 1976; Luther, 1980). Estas ondas se propagan zonalmente en dirección al este a través de la guía de ondas del Ecuador y se convierten en ondas Kelvin u ondas mixtas de Rossby-Gravedad, conocidas también como Ondas Yanai. Cuando estas ondas sienten la frontera continental continúan su propagación a los polos como ondas costeras atrapadas (Clarke, 1983). Luther, 1980 encontró indicios de una respuesta oceánica al forzamiento atmosférico interestacional en los registros del nivel del mar en algunas islas del Pacífico Ecuatorial. Con datos de nivel del mar entre 1971-1975 y 1979-1985 se determina la presencia de ondas de 40-60 días de período y velocidad de fase de 3 cm/s, generadas por oscilaciones atmosféricas en la zona occidental del Pacífico (Spillane, Enfield y Allen, 1987).

En un análisis de nivel del mar, temperatura del mar y presión atmosférica en estaciones de Colombia y Ecuador se obtuvieron ondas kelvin ecuatoriales con 37 días de período en el océano (Martínez, 1998) con muy alta coherencia a las oscilaciones Madden Julian (1972).

El Niño 97-98, configuró un escenario que en el caso de Ecuador empezó manifestándose en marzo de 1997, INOCAR (Instituto Oceanográfico de la Armada-

Ecuador), 1997. La colectividad requería respuestas ágiles y consecuentes con el apremio del momento. En un esfuerzo de aproximación al fenómeno, para Abril/97, luego del diagnóstico oceanográfico del mar ecuatoriano y el subsecuente monitoreo se plantearon tres posibles mecanismos de predicción accesibles y ejecutables: un cálculo de velocidad de propagación de la zona de máximas anomalías océano-atmosféricas en el Pacífico Central (Boletín INOCAR, 1997). El análisis espectral de las series de NMM del evento 97-98 y su comparación con otros eventos, cuyo registro estaba disponible en la base de datos y finalmente el análisis correlativo de las series de tiempo de NMM de varios eventos El Niño con el 97-98. Estos dos últimos serán descritos en este artículo.

Tomando en cuenta la naturaleza de la metodología empleada fue necesario plantear tres hipótesis para la predicción:

- El evento El Niño involucra el forzamiento del sistema acoplado océano-atmósfera por oscilaciones que le dan el carácter aproximado de recurrente (Bjerkness, 1961).
- Tomando en cuenta la amplitud y frecuencia de las oscilaciones ciertas características pueden repetirse en el tiempo y generar eventos de comportamiento similar.
- La variabilidad del nivel medio del mar (NMM) contiene implícita la evolución dinámica y térmica del océano durante el evento El Niño (Wirtki, 1975).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se analizaron las series de nivel del mar de la estación mareográfica del INOCAR en La Libertad (02° 15'S- 81°27,0'W) de los siguientes años: 1951-1952, 1957- 1958, 1965-1966, 1972-1973, 1976-1977, 1982-1983, 1986-1987, 1991-1992, años que tuvieron la influencia de un evento El Niño. Cada serie segmentada correspondiente a cada evento El Niño fue analizada individualmente. La identificación de los intervalos de tiempo de las series se efectuó en base a las anomalías de la TSM y las anomalías detectadas en el NMM de acuerdo a las normales establecidas en la estación de La Libertad, (Zambrano, 1998). Los datos faltantes fueron pocos y se interpolaron mediante el polinomio de interpolación cúbica (cubic spline).

El intervalo de muestreo para las series fue de 1 día, la frecuencia de muestreo 1 por día, de tal forma que las frecuencias altas (ondas capilares, de ultragravedad, infragravedad) y las comunes de marea fueron filtradas en el muestreo.

La frecuencia Nyquist, para todas las series de datos fue de 0.5 ciclos/día ($T=2$ días). Los espectros de

energía o autoespectros fueron calculados usando el MATLAB a través del método del periodograma promedio (Welch, 1986). La serie de tiempo fue dividida en secciones de 128 datos cada una de las cuales fue normalizada en forma automática por el programa, posteriormente se les aplicó una ventana "hanning", del tamaño de las secciones para la eliminación de lóbulos laterales. Las magnitudes elevadas al cuadrado de la transformada discreta de Fourier de las distintas secciones fueron promediadas para obtener la densidad espectral.

Todos los espectros fueron calculados utilizando 32 grados de libertad, de tal manera de alcanzar la estabilidad estadística y un intervalo de confianza del 95%.

Tomando en cuenta que mediante el análisis de Fourier el dominio del tiempo es reemplazado por el dominio de la frecuencia y que esto implica asumir la presencia permanente con diferente cantidad de energía de todos los modos componentes involucrados en la señal del nivel del mar, independientemente del intervalo de tiempo seleccionado, se obtuvo la densidad espectral de cada uno de los intervalos seleccionados para obtener los modos característicos de cada uno de los eventos El Niño. Estos espectros fueron comparados cada uno con la densidad espectral del segmento de la serie desde Enero/97 hasta Junio/97.

Los espectros cruzados permitieron obtener los niveles de coherencia y los espectros de fase para encontrar los desfases temporales de cada uno de los modos predominantes.

Una vez identificados los modos de más alta coherencia entre los espectros, las amplitudes y los ángulos de fase, se generó una serie artificial de nivel del mar a partir de la serie de Fourier (1):

Siendo:

(1)

$$\eta(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{N/2} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t)$$

Siendo a_n y b_n los coeficientes determinados a través de un análisis discreto de N valores de la serie de nivel del mar $\eta(t)$, muestreados a intervalos iguales Δt y ω_n la frecuencia de las ondas determinadas en los espectros. Los coeficientes a_0 , a_n y b_n son dados por las expresiones (2), (3) y (4) respectivamente.

(2)

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \eta_0(k \Delta t) \cos(\omega_n k \Delta t)$$

(3)

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \eta_0(k \Delta t) \sin(\omega_n k \Delta t)$$

(4)

$$a_0 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \eta_0(k \Delta t)$$

En donde η_0 es el nivel del mar a partir del cual se inicia la generación de la serie. Expresando los cosenos y senos en términos complejos, finalmente se obtiene la expresión consolidada utilizada para la predicción (5).

(5)

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{N/2} R_n \cos(\omega_n t - \phi_n)$$

En donde:

(6)

$$R_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Y:

(7)

$$\phi_n = \arctan\left(-\frac{b_n}{a_n}\right)$$

Para el caso del trabajo realizado, R_n y ϕ_n son proporcionados directamente por los resultados de la densidad espectral y el espectro de fase.

La serie generada y la serie observada fueron correlacionadas para verificar el nivel de aproximación de la metodología.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación entre los espectros de los diferentes eventos comparados permitió determinar que el evento 97 tenía la mayor similitud con el evento 1982-1983. Los gráficos de densidad espectral comparada se muestran en la Figura 1. la coherencia obtenida entre los espectros se muestra en la Figura 2. El espectro de fase se muestra en la Figura 3. Las ondas obtenidas y sus principales parámetros se muestran en la tabla 1:

MODO	l/ω	R_n	ϕ	COHERENCIA
(n)	días	cm X día	Rad	
1	41.66	348	2.6	0.71
2	21	200	2.7	0.93
3	17	320	1.1	0.50
4	15	100	2	0.83
5	12	100	2.2	0.67
6	9.7	50	1.8	0.78
7	7	75	2.6	0.92

Tabla 1

La coherencia entre los espectros comparados mostró altos niveles en la mayoría de modos lo cual arrojó una coherencia promedio de 0.76.

El gráfico con la serie observada y la predicción del nivel del mar se muestra en la Figura 4, la correlación alcanzada entre la serie observada y la generada se mantuvo en el orden del 0.73 en promedio durante 9 meses hasta abril/98 cuando el esquema de predicción falla y el nivel del mar observado rompe el patrón establecido y se configura un nuevo máximo de nivel medio del mar que extiende las anomalías hasta julio/98.

La comparación de los espectros es el punto de partida de la aplicación de este método. La similitud encontrada entre los espectros de los eventos 1982-1983 y 97 sugiere que el comportamiento dinámico del océano en estos dos eventos tuvo mucha similitud, lo cual se traduce en tener señales del mismo período, actuando con similares niveles de energía, pero con un desfase temporal en cada uno de los modos. El resultado de generar la serie en base a este esquema es muy aproximado al registro observado. El nivel de correlación tomando en cuenta la cantidad de señal filtrada en el modelo es aceptable, específicamente para determinar las tendencias del comportamiento en el nivel del mar, aún cuando la determinación del valor absoluto del nivel del mar tenga más error. Este resultado sugiere que los eventos El Niño en cuanto a su manifestación en la dinámica del océano, podrían tener patrones de comportamiento posiblemente recurrentes en la medida que el conjunto de ondas que en tiempo y lugar interactúan entre sí en frecuencia y amplitud son aproximadamente iguales o muy semejantes.

El análisis de las dos series permite establecer el dominio en el espectro del modo de las fluctuaciones Madden-Julian de 40 días (Madden, Julian, 1972). Aún cuando este incremento podría ser característico de muchos eventos Niño, es particularmente similar entre

El Niño 1982-1983 y el de 1997-1998 en cuanto se refiere a la amplitud del pulso, que muestra niveles de energía muy cercanos en ambos eventos.

El esquema de predicción funcionó consistentemente hasta Abril/98, en donde se produjo un abrupto incremento del nivel del mar. Las verificaciones en los niveles del mar y la estructura vertical de Perú y Chile no registraron esta fluctuación que en cambio si se sintió, aunque muy débil en el sur del Pacífico Colombiano (Boletín de Alerta Climático # 97, 1998). Esta característica de la perturbación sugiere el carácter de naturaleza local de este incremento que podría estar asociado con una alteración aislada en el campo de vientos en las costas del Ecuador y Perú y probablemente un calentamiento muy localizado.

Sin embargo para validar los resultados numéricos se puede observar en la Figura 5 los detalles de las fluctuaciones en las estaciones de INOCAR ubicadas a 10 millas de La Libertad. El primer pulso ocurrió en marzo de 1997 y cuya duración aproximada fue de 60 a 70 días. Luego de un rápido y breve período de recuperación de la termoclina (40-50 días), se produjo el segundo pulso desde octubre de 1997 y con una duración aproximada de 40 días (Martínez et. al, 2000).

Los registros observados sugieren la predominancia de las ondas interestacionales en la evolución del evento El Niño.

La metodología empleada es susceptible a recalibración. La evolución del nivel del mar fue muy consistente con el comportamiento térmico del evento especialmente en la determinación de los máximos. El afinamiento de esta metodología y la inclusión de otros parámetros como la presión atmosférica, el nivel de la isoterma de 15°C y la temperatura superficial del mar en La Libertad y Galápagos podría mejorar considerablemente esta metodología a futuro.

CONCLUSIONES

El método logró un nivel de aproximación del 69% durante 12 meses entre lo estimado y el nivel del mar observado, lo cual permitió dar una buena perspectiva cualitativa de la evolución del evento El Niño.

Los resultados de los espectros del nivel del mar son consistentes con las oscilaciones observadas en la termoclina en la misma estación durante El Niño 1997-1998 evidenciando el papel protagónico de las ondas interestacionales oceánicas (40-70 días) en la evolución dinámica y térmica del ENSO.

Los eventos El Niño tienen patrones de interacción de las ondas oceánicas que podrían ser de naturaleza recurrente, lo cual permitiría mejorar la predicción a partir de la información del nivel del mar.

El esquema de predicción falló en los últimos meses de

El Niño 1997-1998 (a partir de abril 1998) ante la presencia de un tercer pulso que tendría naturaleza ajena a la evolución del evento y de influencia más bien localizada.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador (INOCAR), por el apoyo a la investigación y la provisión de los datos.

A la Doctora María del Pilar Cornejo, por sus sugerencias y conocimientos que contribuyeron a la realización de este trabajo

BIBLIOGRAFÍA

- Bjerkness, J. (1961).** Estudio de El Niño basado en el análisis de las temperaturas de la superficie del océano de 1935-57. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.*, 5(3):217-304.
- Comisión Permanente del Pacífico Sur (1998),** Boletín de Alerta Climático No. 97, pp 2:7.
- Cornejo M.P y Enfield D.(1987),** Propagation and forcing of high frequency sea level variability along the west coast of South America. *J. Geophysical Research.* 92 pp 14323-14345.
- Clark A.J (1987),** The reflection of equatorial waves from oceanic boundaries, *J. Physical Research*, 13, p 1193-1207.
- INOCAR, (1991).** Atlas Meteorológico del Mar Ecuatoriano Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, pp 4-20.
- INOCAR, (1997)a.** Informe científico, Crucero Oceanográfico CO-1-97 Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, pp 6-26.
- INOCAR, (1997)b.** Boletín científico, Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador, 4, pp 1-3.
- Levitus S. Y T.P Boyer (1994).** World Ocean Atlas Temperature. NOAA Atlas NESDIS, 4 pp 117
- Luther, D.S. (1980).** Observations of long period waves in the tropical oceans and atmosphere. PhD Thesis, pp 210.
- Madden, Roland y Julian P. (1972).** Description of Global Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40-50 Day Period. *National Center of Atmospheric Research*, pp 702-708.
- Martínez, R. (1998).** Ondas lineales barotrópicas en la Atmósfera Tropical y el litoral ecuatoriano-colombiano. *Boletín de Instituto Francés de Estudios Andinos*, pp 517-527.
- Martínez R., Zambrano E., Garcés J.(2000).** Variabilidad Oceanográfica en el mar ecuatoriano asociada con el evento El Niño 1997-1998. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 10.
- Reynolds, R. (1982).** A Montly Average Clymatology of Sea Surface Temperature. Technical Report NWS 31, National Meteorological Center. NOAA, Silver Spring, MD., pp 35.
- Spillane , M.C, Enfield y J.S Allen (1987).** Intraseasonal Oscillations in Sea Level along the West coast of the Americas. *J. Physical Research*.
- Welch, H. (1986).** Averaged Periodogram method, in *Matlab user's Manual*: pp 125-129.
- Wunsch C. y Gill A.,(1976).** Observations of equatorially trapped waves in Pacific sea level variations. *Deep Sea Research*, 23, pp 371-390.
- Wirtki, K., (1975).** The dynamic response of equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J. Physical Oceanography*, 5, pp 572-584.
- Zambrano, E. (1998).** Un análisis de la Estructura Termal de la Estación Costera "La Libertad" y su relación con los eventos ENOS. *Acta Oceanográfica del Pacífico*. INOCAR, Vol. 9, No.1, pp 1-8.

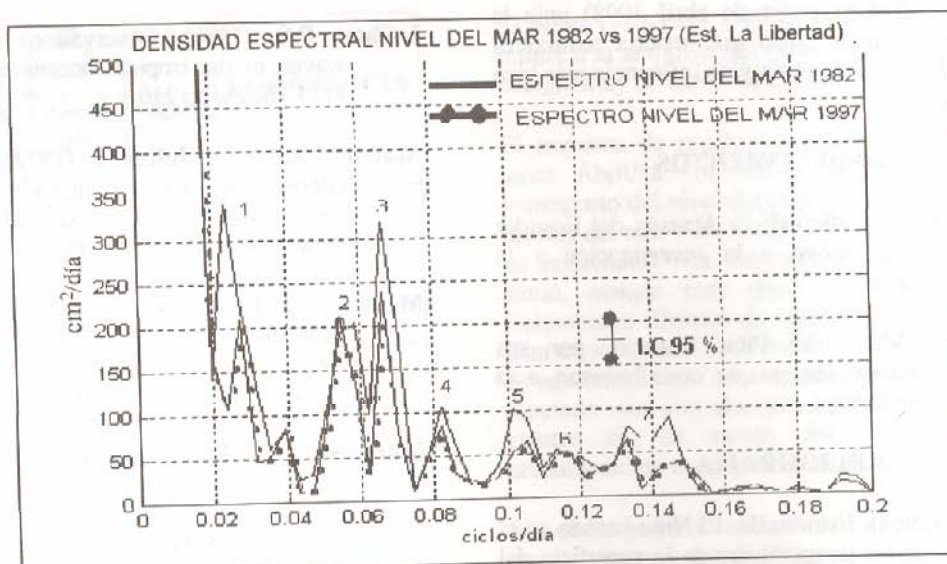


FIGURA 1

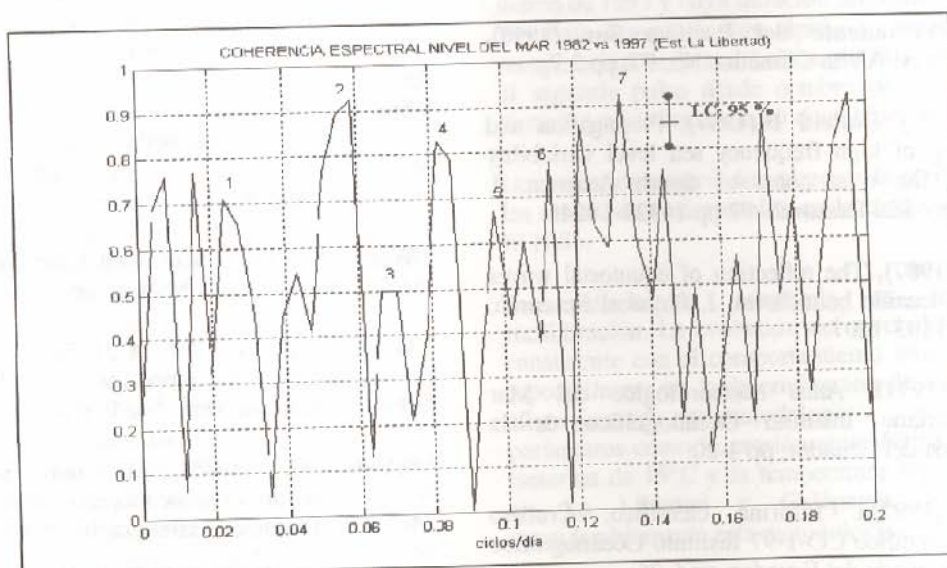


FIGURA 2

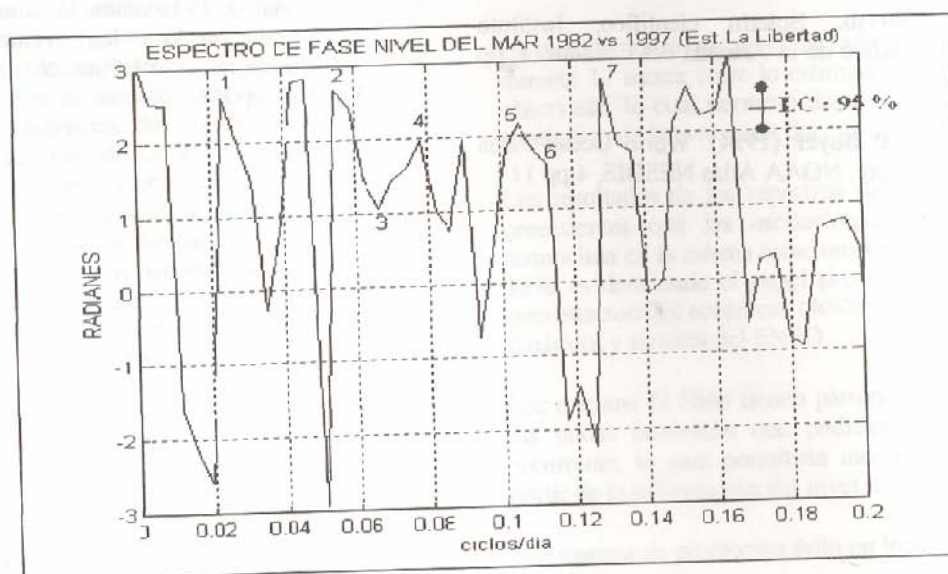


FIGURA 3

PREDICCIÓN DEL NMM VS NMM OBSERVADO EN LA LIBERTAD (ENERO 1997-DICIEMBRE 1998)

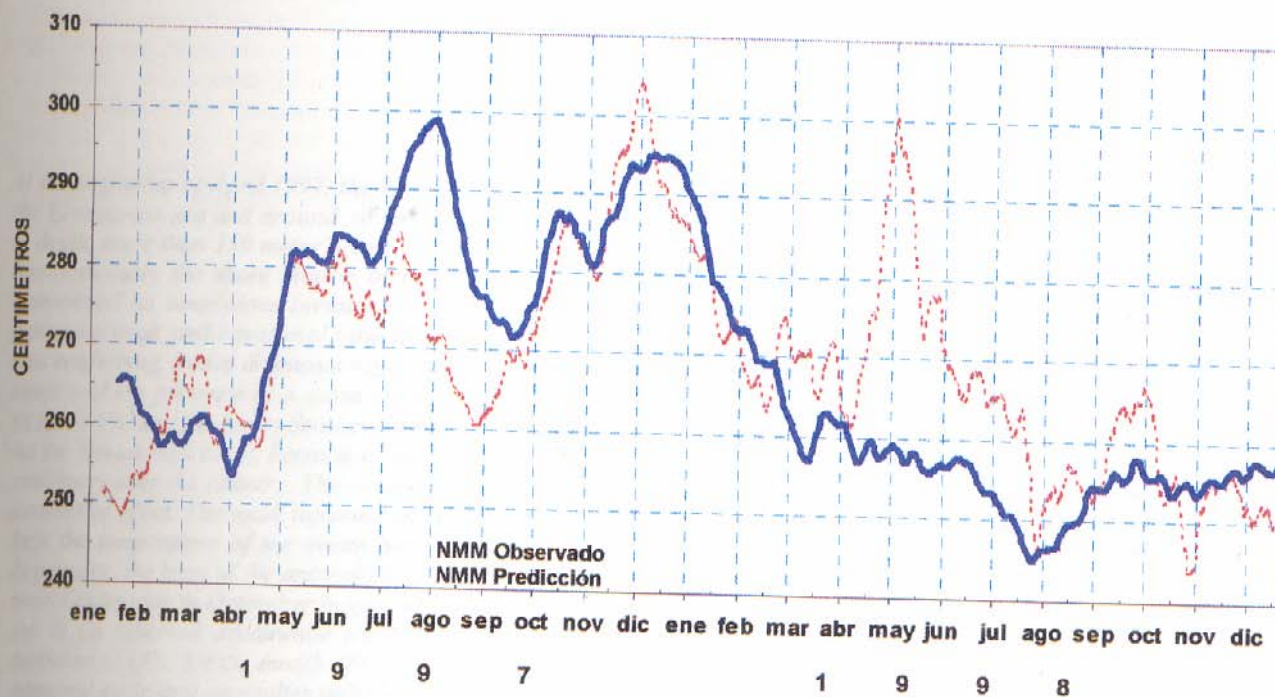


FIGURA 4

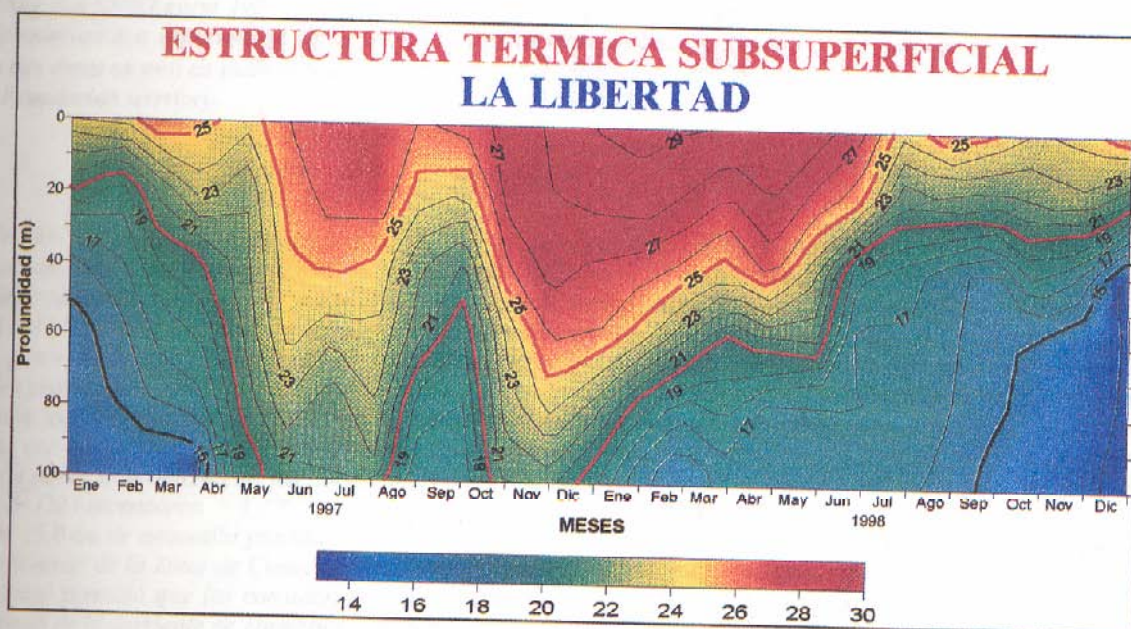


FIGURA 5