

# la predicción continua de las mareas en Puntarenas para los años 1983 - 1990 \*

LUIS MURILLO B \*\*

## RESUMEN

Se usa una versión del método armónico de Shureman para predecir la altura del agua continuamente en Puntarenas, utilizando las seis componentes armónicas principales. Los procedimientos presentados son aplicables hasta el año 1990 y poseen un error absoluto máximo de 0,294 metros. El algoritmo de solución presentado requiere para su ejecución solamente de una calculadora pequeña con capacidad para almacenar 25 datos y un programa BASIC de 100 instrucciones fácilmente ejecutable en una minicomputadora común.

- $A_i$  : amplitud media del componente armónico  $i$  (metros)
- $f_i$  : factor de reducción de la amplitud media del componente  $i$  para el año de predicción requerida
- $w_i$  : velocidad del componente  $i$  (grados/hora)
- $t$  : tiempo de la predicción contado en horas a partir de la época inicial o sea la primera hora del primer día del mes de la predicción
- $V_o + u, o, (V_o + u)_G$  : argumento de equilibrio en Greenwich, Inglaterra para el componente  $i$ .
- $e$  : época del componente  $i$ .

## PROCEDIMIENTOS

La altura del agua según los métodos usuales de análisis armónico (Shureman 1958, Hayes and Stuij 1975) está dada por:

$$h = h_o + \sum f_i * A_i * [\text{Cos}(w_i * t + (V_o + u) - e_i)]$$

Ecuación No. 1

en donde:

- $h$  : altura del agua debida a la marea en cualquier tiempo  $t$  (metros)
- $h_o$  : altura media del agua sobre el nivel de referencia (datum) del lugar (1,39 metros para Puntarenas)

\* Esta publicación es posible gracias a la ayuda prestada por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica y su Centro de Investigaciones Marinas (CIMAR) mediante el proyecto No. 02071419

\*\* Universidad de Costa Rica. Centro Regional de Occidente, Centro de Investigaciones Marinas (CIMAR).

El valor del factor de reducción  $f_i$  de la componente  $i$  para los años 1983 - 1990 está dado en el cuadro No. 1. El valor de las amplitudes para las diferentes componentes se obtiene del cuadro No. 2, lo mismo que las velocidades y épocas.

CUADRO No. 1. El factor de reducción para los años 1983 - 1990.

	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
$K_1$	1,026	1,060	1,086	1,104	1,112	1,111	1,100	1,079
$K_2$	1,045	1,142	1,226	1,285	1,315	1,310	1,270	1,203
$O_1$	1,041	1,096	1,140	1,168	1,182	1,180	1,161	1,128
$M_2$	0,997	0,984	0,974	0,967	0,964	0,964	0,969	0,977
$N_2$	0,977	0,984	0,974	0,967	0,964	0,964	0,969	0,977
$S_2$	1	1	1	1	1	1	1	1

CUADRO No. 2. Componente, amplitud, velocidad, época época Puntarenas.

N. de componente i	Componente	Amplitud (metros) A	Velocidad (grados/hora) w	Epoca Greenwich (grados) e	Epoca Puntarenas (grados) -e'
1	K <sub>1</sub>	0,1070	15,04	349,1	-343,7
2	K <sub>2</sub>	0,0762	30,08	128,8	-118,0
3	O <sub>1</sub>	0,0396	13,94	22,4	-23,6
4	M <sub>2</sub>	1,565	28,98	76,0	-71,8
5	N <sub>2</sub>	0,232	28,44	39,6	-38,6
6	S <sub>2</sub>	0,261	30,00	136,2	-125,9

\*: Estos datos fueron calculados basándose en el análisis armónico de la marea realizado por la N.O.A.A., del Departamento de Comercio de los Estados Unidos. El análisis utilizó 369 días de alturas horarias comenzando el 8 de abril de 1941.

Para cada componente armónica, el argumento de equilibrio en Greenwich para el año y mes en que se desea la predicción se obtiene de los cuadros No. 3 y No. 4. El argumento de equilibrio en Greenwich deberá ser luego modificado para obtener el valor del argumento apropiado al lugar de la predicción, que en nuestro caso, es Puntarenas, según la relación:

$$(V_o + u)_L = (V_o + u)_G + (w * S / 15 - p * L)$$

en donde:

(V<sub>o</sub> + u)<sub>L</sub> : argumento de equilibrio local (Puntarenas),

S : meridiano temporal correspondiente al lugar de la predicción (para Puntarenas S = 90 °0 + 6 horas),

p : es igual a 1 para las componentes diurnas K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub> y es igual a 2 para las componentes semidiurnas M<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, y K<sub>2</sub>.

L : longitud oeste (positiva) del lugar de la predicción (para Puntarenas L = 84,82 °0).

La corrección al argumento de equilibrio también se puede interpretar como una corrección a la época e, de tal modo que la época corregida e' se pueda restar a la otra parte del argumento de los cosenos de la sumatoria de la ecuación 1, de este modo:

$$-e' = w * S / 15 - p * L - e$$

CUADRO No. 3. (V<sub>o</sub> + u) anual

componente	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
K <sub>1</sub>	1,5	2,4	4,9	6,9	9,2	11,6	14,8	16,7
K <sub>2</sub>	182,6	184,2	189,3	193,5	198,3	203,3	210,0	213,9
O <sub>1</sub>	321,4	60,8	134,2	232,6	330,7	68,8	141,6	240,1
M <sub>2</sub>	319,1	60,0	136,8	238,1	339,6	81,0	158,1	259,4
N <sub>2</sub>	311,2	323,4	298,4	311,0	323,7	336,4	311,7	324,3
S <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Ahora -e' deberá sumarse a w \* t + (V<sub>o</sub> + u)<sub>G</sub> para completar el argumento de cada coseno de la ecuación 1. Debido a la mayor sencillez de este procedimiento, el autor ha calculado las épocas corregidas -e' para cada una de las componentes armónicas y sus resultados se encuentran en el cuadro No. 2. Esta última corrección a la época es válida para todos los tiempos y una vez hecha se puede usar para todos los años. De esta forma la predicción de las alturas del agua causadas por las mareas se puede hacer simplemente de la siguiente manera:

- 1) usamos el cuadro No. 1 para obtener f<sub>i</sub>
- 2) del cuadro No. 2 obtenemos A<sub>i</sub>, w<sub>i</sub>, y -e'<sub>i</sub>
- 3) obtenemos (V<sub>o</sub> + u)<sub>G</sub> correspondiente al año y al mes de la predicción de los cuadros No. 3 y No. 4.
- 4) finalmente construimos la expresión:

$$h(t) = h_o + \sum_{i=1}^6 f_i * A_i * [ \text{Cos}(w_i * t + (V_o + u)_{G,i} - e'_i) ]$$

Ecuación No. 2

### APLICACION DEL METODO

Este método fue aplicado para predecir la altura de las aguas durante los primeros días del mes de marzo de 1980 en Puntarenas con los resultados expuestos en el cuadro No. 5. Nótese que el error máximo fue de 0,2 metros. Se escribió un programa para la ecuación No. 2 de 100 pasos en el lenguaje BASIC que requiere de solo 25 memorias. El programa es fácilmente ejecutable en mini-computadoras como las HP-67,-97 u 87, Apple,

etc. Haciendo una corrida para períodos largos (un mes) se nota la predominancia de la componente  $M_2$  que domina el período de oscilación (12,4 hrs.).

Las amplitudes medias de la marea para el mes típico (Agosto 1980) toman valores de 2,3 metros.

CUADRO No. 4. ( $V_o + u$ ) mensual (al primer día del mes).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre	Nov.	Dic.
$K_1$	0,00	30,56	58,15	88,71	118,28	148,83	178,40	208,96	239,51	269,08	299,64	329,21
$K_2$	0,00	61,11	116,31	177,42	236,56	297,66	356,80	57,91	119,02	178,16	239,27	298,41
$O_1$	0,00	293,62	303,34	236,96	195,94	129,56	88,55	22,16	315,78	274,77	208,39	167,37
$M_2$	0,00	324,17	1,49	325,66	314,22	278,39	266,95	231,12	195,3	183,85	148,02	136,58
$N_2$	0,00	279,16	310,66	229,82	186,42	105,58	62,18	341,34	260,50	217,11	136,27	92,87
$S_2$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

CUADRO No. 5. Las predicciones para el mes de marzo de 1980

Tiempo horas:minutos	Altura predicha (metros)	Altura según la tabla de mareas (N.O.A.A.)	Error (metros)
1 de marzo			
2:40	2,5	2,5	0,0
8:50	0,2	0,1	+ 0,1
15:04	2,5	2,6	- 0,1
21:09	0,3	0,2	+ 0,1
2 de marzo			
3:18	2,5	2,6	- 0,1
9:25	0,2	0,0	+ 0,2
15:41	2,6	2,7	- 0,1
21:44	0,2	0,1	+ 0,1
3 de marzo			
3:54	2,6	2,6	0,0
9:59	0,1	0,0	+ 0,1
16:16	2,6	2,7	- 0,1
22:19	0,2	0,1	+ 0,1
4 de marzo			
4:30	2,5	2,6	- 0,1
10:31	0,1	0,0	+ 0,1
16:49	2,7	2,7	0,0
22:52	0,2	0,1	+ 0,1

## CONCLUSIONES FINALES

El error máximo absoluto del método será igual a la suma de las amplitudes de las componentes armónicas no incluidas en la ecuación No. 2. Este valor es igual a 0,294 metros según el análisis del Departamento de Análisis Mareográfico de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Data Center (J.E. Fencher, comunicación personal).

Se debe también indicar que las alturas predichas incluyen los efectos de la marea propiamente dicha y nada más. Es decir, no se incluyen posibles variaciones en la altura del agua originadas en el viento, las olas, variaciones en la presión atmosférica, la temperatura, la densidad o las vibraciones propias del Golfo de Nicoya debidas a resonancias con alguna perturbación externa al Golfo (Seiches). Estos temas son de gran importancia y deberán ser estudiados en el futuro. Los cálculos hechos por este método fueron comparados con los cálculos hechos por medio de un Modelo Hidrodinámico Bidimensional (Murillo 1981) y se encontró completo acuerdo. Este último método para la predicción de las alturas del agua (y las corrientes) posee la enorme ventaja de hacer predicciones cuasicontinuas sobre todo el Golfo de Nicoya simultáneamente (por ejemplo en 330 puntos interiores cada 0,02 horas). Debido a los diferentes desfases y velocidades de las componentes armónicas no incluidas en la ecuación No. 2, será poco probable que el error máximo llegue a ser 0,294 metros, como se puede calcular. En varios experimentos el autor encontró un error máximo esperado de 0,2 metros únicamente,

Para efectos de la predicción de las alturas de marea en zonas cercanas a Puntarenas, como Caldera, se puede asumir un desfase de pocos minutos fácilmente calculable con el Modelo Hidrodinámico (Murillo 1981). Estos y otros muchos aspectos físicos de la circulación en el Golfo de Nicoya y sus alrededores son relativamente fáciles de estudiar mediante modelos hidrodinámicos siempre que estos hayan sido ajustados y verificados como el modelo al que se hizo referencia anteriormente.

Los procedimientos presentados en esta publicación dan promedios mensuales de amplitud de marea que concuerdan con los promedios mensuales de amplitud horaria obtenidos por el Instituto Geográfico Nacional (Sección de Cálculo) para los

años 1970—1978, según los cuales la amplitud media anual es de 2,3 metros.

Este análisis refuerza la validez de los cálculos hechos por el autor (Murillo 1983) para el volumen del prisma de marea cuya amplitud media se calculó como 2,3 metros. La magnitud del prisma sufrirá variaciones mínimas en ausencia de vientos muy fuertes, oscilaciones propias u otros fenómenos naturales extraordinarios (Tsunamis, huracanes, etc.).

## LITERATURA CITADA

- Hayes, F. Ch., Stuij, J. **Manual for Hydrographic and Hydrometric Surveys.** Waterloopkundig Laboratorium. Delft Hydraulics Laboratory. Publication No. 145, Mayo 1975.
- Murillo B., L. M. **Modelling Tidal Hydrodynamics and Dispersion in the Gulf of Nicoya, Costa Rica.** Oregon State University, 1981.
- Murillo B., L. M. *Un Modelo para el Régimen de Intercambio Dispersivo en el Estero de Puntarenas.* **Tecnología en Marcha** T. 6(2): 15—22. Jul.—Set.
- Shureman P., **Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides.** U.S. Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey. Special Publication No. 98. Washington 1958.