

*SOBRE LA CONFIGURACION COTIDAL EN EL  
PACIFICO ECUATORIAL \**

FRANCISCO GRIVEL PIÑA \*\*  
Y GORDON W. GROVES \*\*\*

RESUMEN

Se examinaron datos mareográficos de seis islas en el Pacífico Ecuatorial, la mayor parte de las cuales nunca se habían tomado en cuenta en la construcción de cartas de la marea. Las constantes armónicas obtenidas para las componentes  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  y  $O_1$  fueron comparadas con cartas cotidales publicadas. La concordancia en general es buena; las mayores discrepancias se notaron en la región de las Islas Tuamotu y las Tubuai, en donde las amplitudes son menores.

LAS OBSERVACIONES

Durante el Año Geofísico Internacional, 1957-1958, se hicieron observaciones mareográficas en muchas islas del Pacífico con el fin de determinar la fluctuación estacional y otras variaciones de largo período en el nivel del mar. A pesar de que los datos originales consistían en valores horarios del nivel del mar, de modo que servirían para estudiar fluctuaciones de más alta frecuencia tales como las de la marea diurna y semidiurna, hasta ahora estos datos no han sido utilizados para análisis de la marea.

Se examinaron los datos horarios del nivel del mar en las estaciones indicadas en la Tabla I.

TABLA I

ISLA ISLAND	GRUPO GROUP	LATITUD LATITUDE	LONGITUD LONGITUDE	FECHAS DATES	DURACION DURATION
ARORAE	GILBERT	02°37'S	176°50'E	(29-VII-57 30-XII-57)	154
				(25-I-58 28-XI-58)	308
				(4-I-59 15-X-59)	285
HULL	PHOENIX	04°30'S	172°10'W	(6-III-57 31-XII-57)	301
JARVIS	LINE	00°23'S	160°02'W	(20-VIII-57 23-XI-57)	95
FANNING	LINE	03°54'N	159°24'W	(11-VIII-57 25-XI-57)	107
				(9-XII-57 13-I-58)	36
				(21-I-58 21-IV-58)	91
				(19-V-58 8-XI-58)	174
TAKAROA	TUAMOTU	14°30'S	145°00'W	(14-VI-57 10-VIII-57)	58
				(14-IX-57 2-I-58)	110
				(31-I-58 12-I-59)	347
RURUTU	TUBUAI	22°28'S	151°20'W	(16-V-57 14-VI-57)	30
				(31-VII-57 24-I-59)	543

\* CONTRIBUCIÓN No. 1005, INSTITUTO DE GEOFÍSICA, U.N.A.M.  
\*\* Instituto de Geofísica, U.N.A.M., y Secretaría de Marina.  
\*\*\* Instituto Geofísico de Hawaii Universidad de Hawaii.

*ON THE COTIDAL CONFIGURATION IN THE  
EQUATORIAL PACIFIC \**

FRANCISCO GRIVEL PIÑA \*\*  
AND GORDON W. GROVES \*\*\*

ABSTRACT

Tide data from six scattered Pacific Islands, most of which heretofore had unknown tidal characteristics, are examined. The harmonic constants obtained for the constituents  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$  were compared with published cotidal charts. The agreement was generally good, the largest discrepancies occurring in the Tuamotu Islands and Tubuai Islands, where the amplitudes are smallest.

THE OBSERVATIONS

During the International Geophysical Year, 1957-1958, sea-level observations were made at several islands in the Pacific for the purpose of determining the seasonal fluctuation and other long-period variations in sea level. Although the original data were tabulated at hourly intervals, and could have been used to study fluctuations of higher frequency, such as the diurnal and semidiurnal tides, those data had not been previously subjected to tidal analysis.

The hourly tidal heights used in the present discussion are from the stations indicated in Table I.

TABLE I

\* CONTRIBUTION No. 1005, INSTITUTE OF GEOPHYSICS, N.A.U.M.  
\*\* Institute of Geophysics, N.A.U.M. and Secretaría de Marina.  
\*\*\* Hawaii Institute of Geophysics, University of Hawaii.

La determinación de las constantes armónicas de la marea fue hecha por un método de mínimos cuadrados. Básicamente, se considera que cualquier componente dada se representa en la forma

$$\zeta = H \cos (\sigma t + \alpha) \quad (1)$$

$$\bar{\zeta} = \bar{H} \cos (\sigma t + \beta - p \phi)$$

en donde  $\zeta$  es el nivel observado en la estación de que se trate,  $\bar{\zeta}$  es la altura de la marea de equilibrio sobre toda la superficie de los océanos,  $\sigma$  es la frecuencia,  $\phi$  es la longitud terrestre (positiva hacia el oeste de Greenwich),  $p = 1$  para una componente diurna,  $p = 2$  para una componente semi-diurna,  $\bar{H}$  es el valor que depende solamente de la latitud terrestre y  $t$  es el tiempo referido a la mitad de la serie de observaciones. El análisis de la marea da como resultado, estimaciones de la amplitud  $H$  y la fase  $\alpha$  para cada componente de importancia. Las efemérides del Sol y de la Luna determinan el valor de la fase  $\beta$ .

La diferencia en fase de la marea de equilibrio y la marea observada es la *época local*,

$$\kappa = \beta - p \phi_0 - \alpha \quad (2)$$

en el sitio en que se observa, en donde  $\phi_0$  es la longitud terrestre de ese sitio. Pero para la construcción de cartas de la marea se necesita una fase que represente al retraso de la marea observada en relación de una marea de equilibrio única. Para esta última, generalmente se utiliza el argumento de la marea de equilibrio en el meridiano de Greenwich, y se considera el parámetro.

$$G = \beta - \alpha = \kappa + p \phi_0 \quad (3)$$

llamado *época de Greenwich*, cuyos valores indicarán la fase que tendrá la componente dada simultáneamente en todas partes del océano. Los resultados de los análisis están presentados en la Tabla II.

(Las componentes de la Tabla II son según el desarrollo de Darwin, en que cada componente podría ser representada por una "casi-senoide" con amplitud y fase que varían lentamente con el tiempo. Estas complicaciones son despreciables).

Los instrumentos utilizados en Arorae y Hull tenían un sifón con respuesta lineal y retraso de alrededor de 15 minutos, lo cual ha sido compensado. Se supone que no era necesario aplicar tales correcciones a los resultados de las otras estaciones.

The determination of the tidal harmonic constants was carried out by a least squares methods. Basically, each constituent is considered to have the form

where  $\zeta$  is the observed sea level at the station,  $\bar{\zeta}$  is the height of the equilibrium tide over the entire surface of the oceans,  $\sigma$  is the frequency of the constituent,  $\phi$  is geographical longitude (positive west of Greenwich),  $p = 1$  for a diurnal constituent,  $p = 2$  for a semidiurnal constituent,  $\bar{H}$  is a quantity which depends only on geographical latitude, and  $t$  is time referred to the center of the series of observations used in the analysis. The tidal analysis provides estimates of the amplitude  $H$  and phase  $\alpha$  for each important constituent. The ephemerides of the Sun and Moon determine the phase  $\beta$ .

The phase difference between the equilibrium and observed tide is the *local epoch*,

at the place, where  $\phi_0$  is the geographical longitude of that place. But the construction of cotidal charts requires a phase parameter which represents the lag of the observed tide relative to a unique equilibrium tide. For the latter, the argument of the equilibrium tide on the Greenwich meridian is generally used, and the parameter

is called the *Greenwich Epoch*. Its values indicate the phase of the given constituent simultaneously over the entire ocean. The results of the tidal analysis are presented in Table II.

(The constituents of Table II are according to Darwin's development, wherein each constituent is represented by a "quasi-sinusoid" with amplitude and phase which vary slowly with time. These complications are negligible here).

The instruments used at Arorae and Hull had a siphon with a linear response and time lag of about 15 minutes, which has been compensated. It is assumed that it was not necessary to make a similar correction at the other stations.

TABLA II

TABLE II

	ARORAE			HULL			JARVIS			FANNING			TAKAROA			RURUTU		
	H cm	G°	κ°	H cm	G°	κ°	H cm	G°	κ°	H cm	G°	κ°	H cm	G°	κ°	H cm	G°	κ°
M <sub>2</sub>	57.7	143.2	136.9	43.4	143.5	159.2	24.6	94.5	134.4	24.6	104.3	145.5	24.0	31.3	101.3	18.8	250.3	307.6
S <sub>2</sub>	27.6	154.9	148.6	17.9	145.7	161.4	9.3	112.4	152.3	8.8	123.4	164.6	5.4	9.8	79.8	10.2	308.3	5.6
K <sub>1</sub>	7.5	64.4	241.2	4.0	93.0	280.8	6.6	210.6	50.6	7.9	213.4	54.0	2.3	244.8	99.8	1.6	51.1	259.8
O <sub>1</sub>	4.8	52.0	228.8	2.6	69.8	257.6	2.4	182.6	22.6	3.4	201.1	41.7	0.9	179.3	34.3	2.4	76.2	284.9
N <sub>2</sub>	13.4	39.9	33.6	10.5	139.5	155.2	3.8	82.8	122.7	4.6	105.6	146.8	4.5	7.1	77.1	3.3	274.8	332.1
K <sub>2</sub>	7.6	46.9	40.6	6.2	191.8	207.5	3.0	48.4	88.3	1.4	147.6	188.8	2.3	19.3	89.3	2.7	291.6	348.9
P <sub>1</sub>	2.2	66.8	243.6	1.0	98.6	286.4	1.7	174.8	14.8	2.6	210.5	51.1	0.7	252.8	107.8	0.5	42.0	250.7
μ <sub>2</sub>	2.0	127.1	120.8	1.4	130.4	146.1	1.4	188.5	228.4	0.9	49.7	90.9	0.7	359.3	69.3	0.5	182.0	239.3
2N <sub>2</sub>	2.0	124.4	118.1	1.7	129.9	145.6	1.3	5.5	45.4	0.8	151.4	192.6	0.6	13.8	83.8	0.3	193.9	251.2
v <sub>2</sub>	1.9	138.9	132.6	2.1	138.9	154.6	0.8	160.3	200.2	0.5	115.5	156.7	0.7	19.8	89.8	0.4	238.7	296.0
T <sub>2</sub>	1.9	161.4	155.1	1.0	105.6	121.3	0.6	126.6	166.5	0.3	55.6	96.8	0.5	349.5	59.5	0.8	305.5	2.8
L <sub>2</sub>	1.7	29.1	22.8	0.9	131.3	147.0	0.9	159.7	199.6	1.2	121.8	163.0	0.4	51.1	121.1	0.8	274.8	332.1
Q <sub>1</sub>	1.0	22.1	198.9	0.7	44.2	232.0	0.3	155.8	355.8	0.6	151.7	352.3	0.2	135.7	350.7	0.5	72.3	281.0
Mf	2.4	332.4		1.4	7.0		2.6	16.4		2.3	340.8		0.6	50.8		1.3	51.5	
Mm	1.0	3.2		0.8	44.3		0.9	7.1		1.0	51.7		0.7	72.3		0.3	118.5	
Msf	0.2	156.7		0.6	51.7		0.2	80.1		0.8	123.3		0.4	154.9		0.3	69.6	
Sa	3.7	64.0		6.8	247.0					11.8	216.1		2.7	0.5		10.1	274.4	
Ssa	3.6	54.4		2.1	355.0					2.7	287.3		2.6	303.2		4.6	299.6	

Ho = 1.255 m

Ho = 1.178 m

Ho = 0.874 m

Ho = 1.880 m

Ho = 1.586 m

Ho = 1.115 m

Ho = Nivel del mar sobre el cero de referencia de las observaciones mareográficas.

Ho = Sea level above zero of reference of tide observations.

## CONCLUSIONES

La distribución dispereja de las estaciones mareográficas en el océano siempre ha dificultado el estudio de la distribución de la marea. La mayor parte de las estaciones están situadas en las costas de los países más desarrollados, y la vasta mayoría están en el borde del océano, muy pocas en islas en el interior.

Así es que la mayor mejoría en el alcance de las observaciones provendría de más observaciones en el interior del océano, y por eso, conviene hacer uso de todos los datos de estaciones situadas en islas oceánicas.

Otra de las dificultades en la construcción de cartas de la marea ha sido la de que los gradientes espaciales son mayores precisamente en las cercanías de las islas y costas en donde están situadas las estaciones mareográficas. Es decir, la marea observada en las costas e islas puede ser muy distinta de la que ocurre en agua profunda a corta distancia frente a la estación mareográfica. Este problema es mayor en el caso de mareógrafos situados en estuarios, lagunas costeras, etc., y menor para mareógrafos situados frente al mar abierto. En el caso de islas, casi todas las estaciones anteriores han estado situadas dentro de bahías, puertos y lagunas de atolones. Por lo tanto, los datos aquí presentados son más valiosos porque en el Año Geofísico Internacional el propósito era el de investigar fenómenos en el océano, no el de proveer pronósticos de la marea para cabotaje.

Todas las estaciones consideradas aquí estaban en costa abierta con la excepción de Takarao y Rurutu, que estaban dentro de lagunas coralinas, en la parte occidental (sotavento) de las islas. Rurutu es una isla grande con arrecifes costeros; la entrada a la laguna (cerca del mareógrafo), es

## CONCLUSIONS

The irregular distribution of tide stations in the ocean has always made difficult the study of the shape of the tidal wave. The majority of the stations are located along the coasts of the more developed countries, and the vast majority are on the edge of the ocean, very few on islands in the interior. Therefore, the greatest improvement in the distribution of stations would be achieved by obtaining more data from the interior of the ocean, and for that reason it is advantageous to make the best possible use of data from oceanic islands.

Another of the difficulties in the study of the shape of the tidal wave is that the spatial gradients are greatest precisely in the vicinity of islands and coasts where the tide stations are located. That is, the tide observed along coasts and at islands might be quite different from what occurs in deep water at a short distance from the station. This problem is greater in the case of tide gauges located in estuaries, coastal lagoons, etc., and less severe for gauges located on an open coast. In the case of islands, almost all the tide stations heretofore used have been located inside bays, ports, and atoll lagoons. Therefore, the data presented here are more valuable because during the International Geophysical Year the purpose was to study phenomena in the ocean, not to provide tide predictions for commercial sea transport.

All the stations considered here were located on the outer coast, except those of Takarao and Rurutu, which were inside atoll lagoons, on the westward (downwind) sides of the islands. Rurutu is a high island with a fringing reef; the lagoon entrance (near the gauge) was passable only

navegable únicamente por embarcaciones pequeñas. Takaroa es un atolón típico de unos tres kilómetros de largo con su diámetro mayor en dirección NW—SE. El mareógrafo fue colocado en el muelle a la entrada entre la laguna y el mar abierto. Los buques y destroyers de la Armada atracan en el muelle. Las corrientes de marea en el canal alcanzan velocidades de varios nudos.

Una comparación de estos resultados con las cartas de la marea de Bogdanov (1961a, 1961b) y Dietrich (1944) está exhibida en las figuras 1 a 6. Las cartas de Bogdanov dan amplitudes y fases para  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  y  $O_1$ , ambas mostradas en las figuras 1-4. Dietrich únicamente da fases para  $M_2$  y  $K_1$ , mostradas en las figuras 5 y 6. Evidentemente se hizo una tentativa para compensar el efecto local del retraso de la marea en estaciones situadas en lagunas, etc., en la construcción de estas cartas, al menos para la componente  $M_2$ , (porque se nota que nuestro resultado para Hull concuerda bastante bien con las cartas, a pesar de que la única estación cerca de Hull disponible antes era la de la Isla Canton, a una distancia aproximadamente de 200 km., situada dentro de una laguna coralina con un retraso de alrededor de una hora y media!).

Se nota de las figuras que nuestros resultados generalmente concuerdan bien con las cartas de Bogdanov, y menos bien con las de Dietrich. Las más grandes discrepancias se localizan en la región de las Islas Tuamotu y Tubuai. En estos casos suponemos que las únicas estaciones disponibles estaban en las Islas Societe, y que toda esa zona exhibe grandes gradientes espaciales. Además, las amplitudes son más pequeñas en esta región. Una cosa curiosa es que los resultados de fase para las componentes  $M_2$  y  $S_2$  (Fig. 1a. y 2a.) sugieren que el punto amfidrómico debe estar más cerca de la región entre Takaroa y Rurutu, pero en ese caso había de esperarse que la amplitud sería aún más pequeña, lo cual no está confirmado por las figuras 1b. y 2b.

#### AGRADECIMIENTOS:

Agradecemos la ayuda de June Pattullo y Martín Vitousek por sus comentarios y por hacernos disponibles los datos mareográficos tomados durante el Año Geofísico Internacional, a Bernard Zetler y Steacy Hicks por sus comentarios. Los cálculos fueron hechos en el Centro de Cálculo Electrónico de la U.N.A.M. Departamento de Hidrografía, Geodesia y Astronomía de la Dirección General de Faros e Hidrografía, Secretaría de Marina, por la ayuda en la preparación de las figuras.

#### BIBLIOGRAFIA

- BOGDANOV, K. T. 1961a. Novye Karty Kotidalnykh Linii Polusutochnykh Prilivnykh Voln. ( $M_2$  i  $S_2$ ) dlya Tikhovo Okeana. Doklady Akademii Nauk. CCCP, 138, (2): 441-444.
- 1961b. Novye Karty Kotidalnykh Linii Sutochnykh Prilivnykh Voln. ( $K_1$  i  $O_1$ ) dlya Tikhovo Okeana. Doklady Akademii Nauk CCCP, 139, (3): 713-716.
- DIETRICH, G. 1944. Die Schwingungssysteme der halb-und eintägigen Tiden in den Ozeanen. Veröff. Inst. Meeresk. (Univ. Berlin), N.F.A. No. 41.

by small boat. Takaroa is a typical atoll about three kilometers long in major diameter, which lies NW—SE. The gauge was attached to the pier at the entrance between the lagoon and the open ocean. Inter-island vessels and Navy destroyers used the dock. The tidal current in the channel attains velocities of several knots.

A comparison of these results with the cotidal charts of Bogdanov (1961a, 1961b) and Dietrich (1944) is shown in figures 1 to 6. Bogdanov gives charts for  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$ , both amplitude and phase, shown in figures 1-4. Dietrich gives phase only for  $M_2$  and  $K_1$ , shown in figures 5 and 6. An attempt was evidently made to compensate the local effect of lagoon lag, etc., in the construction of these charts at least for the  $M_2$  constituent, (because it is noted that our result for Hull agrees fairly well with the charts, in spite of the fact that the previous tide station closest to Hull was Canton Island, at a distance of approximately 200 km., and was located inside an atoll lagoon having a lag of about an hour and a half!).

It is noted from the figures that our results generally agree well with Bogdanov's charts, somewhat less well with Dietrich's. The region of largest discrepancies is that of the Tuamotu Islands and Tubuai Islands. In this region it appears that the previously-available stations were all in the Societe Islands, and that the entire region has large spatial gradients. Anyway, the amplitudes are the lowest in this region. One curious fact is that the phase results for the constituents  $M_2$ ,  $S_2$  (Fig. 1a, 2a) suggest the existence of an amphidromic point in the zone between Takaroa, Rurutu, but in this case one would have expected the amplitude to have been lower than indicated in Figure 1b, 2b.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The authors express our thanks to June Pattullo and Martin Vitousek for their discussions and for making available their tidal data taken during the International Geophysical Year, and to Bernard Zetler and Steacy Hicks for their discussions. The numerical calculations were carried out at the Centro de Cálculo Electrónico of the N.A.U.M. The Departamento de Hidrografía, Geodesia y Astronomía of the Dirección General de Faros e Hidrografía, Secretaría de Marina, helped in the preparation of the figures.

#### BIBLIOGRAPHY

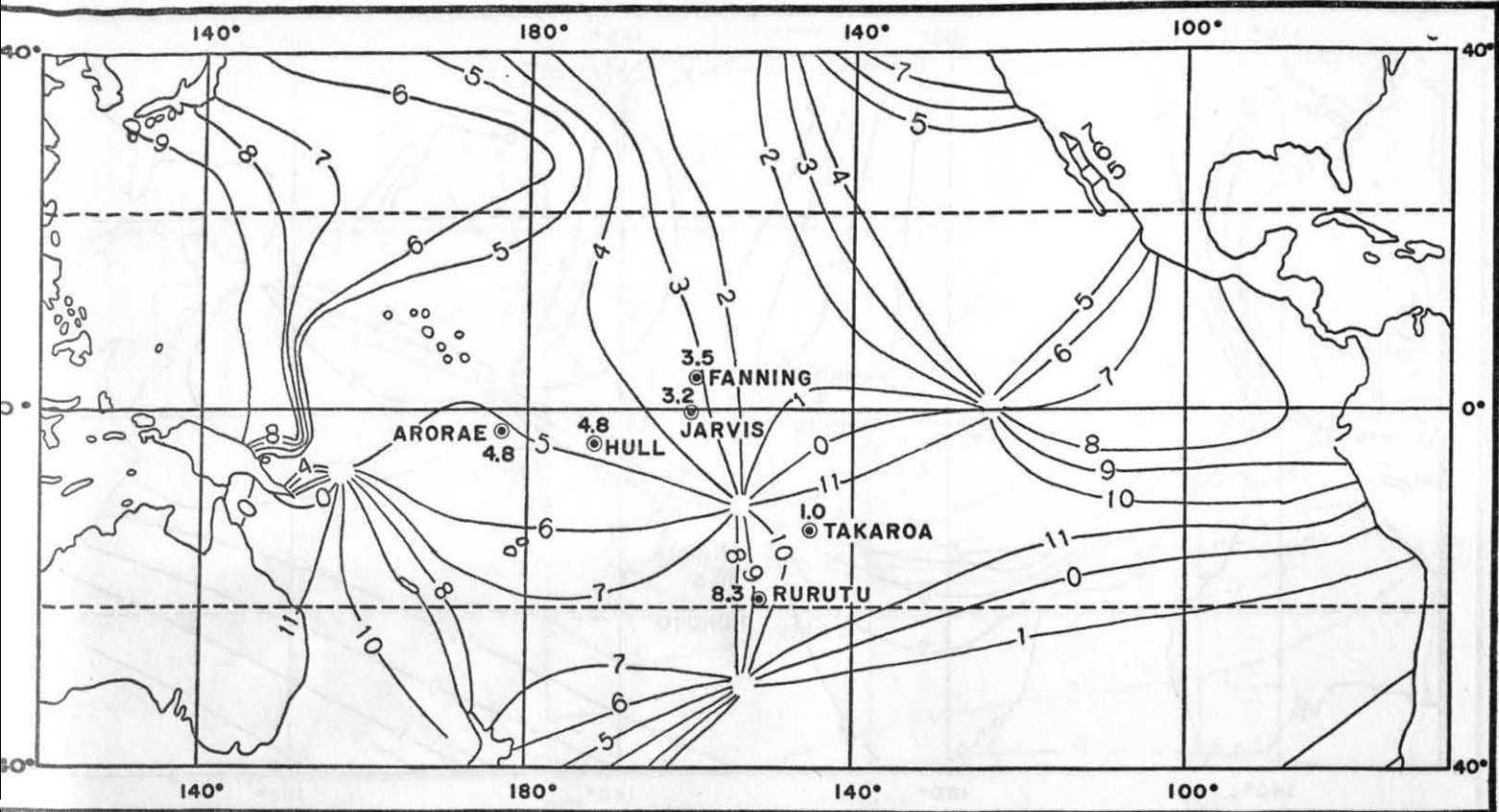


Fig. 1a. Curvas cotidales (en horas componente) de la componente de marea  $M_2$  en el Pacífico Ecuatorial (referidas a Greenwich) tomadas de Bogdanov (1961a). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 1a. Cotidal curves (in constituent hours) of the  $M_2$  constituent in the Equatorial Pacific (referred to Greenwich), taken from Bogdanov (1961a). The six new values herein described are indicated by black dots.

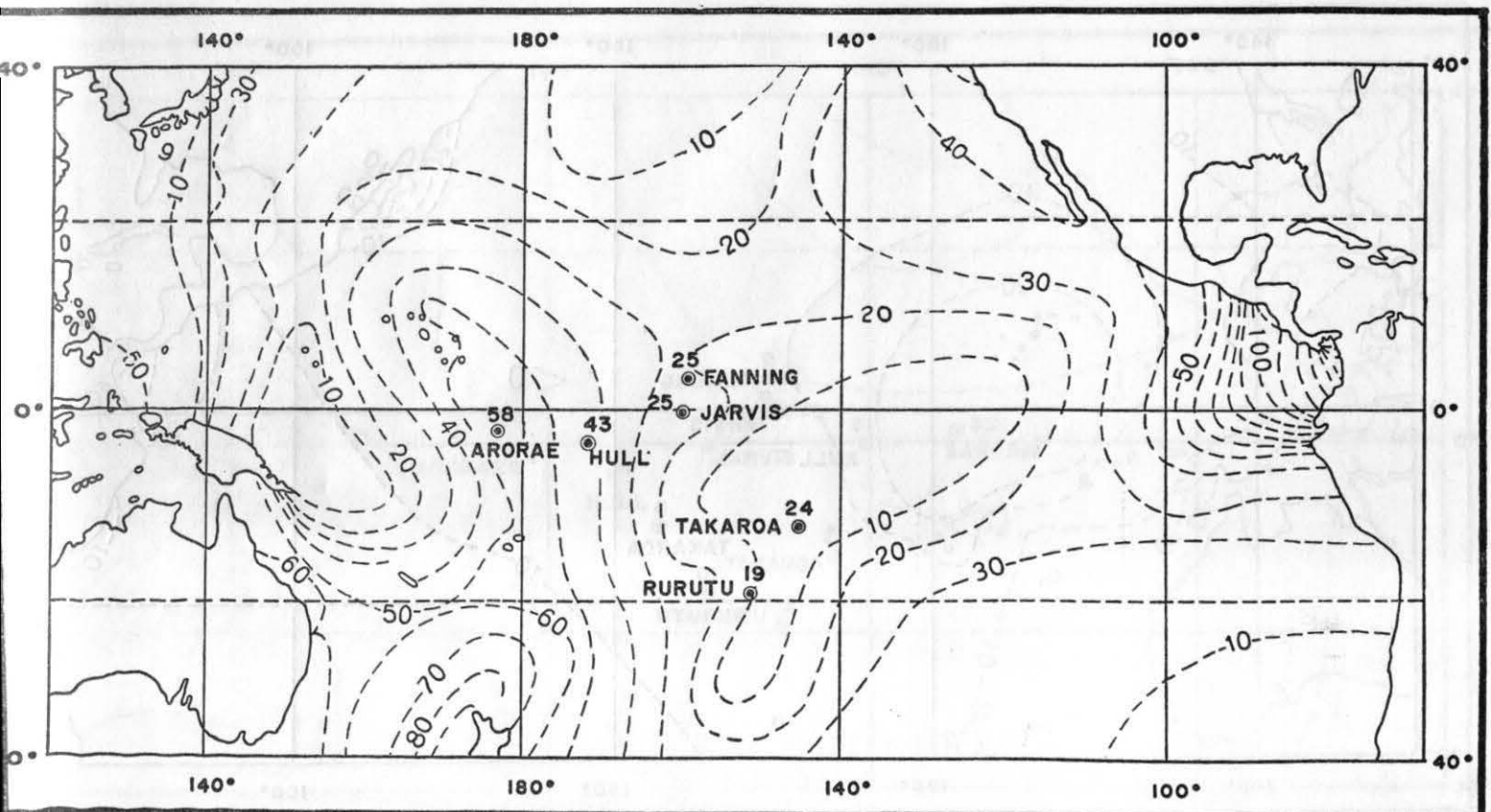


Fig. 1b. Curvas Isoamplitudes (cm.) de la componente de Marea  $M_2$  en el Pacífico Ecuatorial tomadas de Bogdanov (1961a). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 1b. Curves of equal amplitude (cm.) for the  $M_2$  constituent in the Equatorial Pacific, taken from Bogdanov (1961a). The six new values herein described are indicated by black dots.

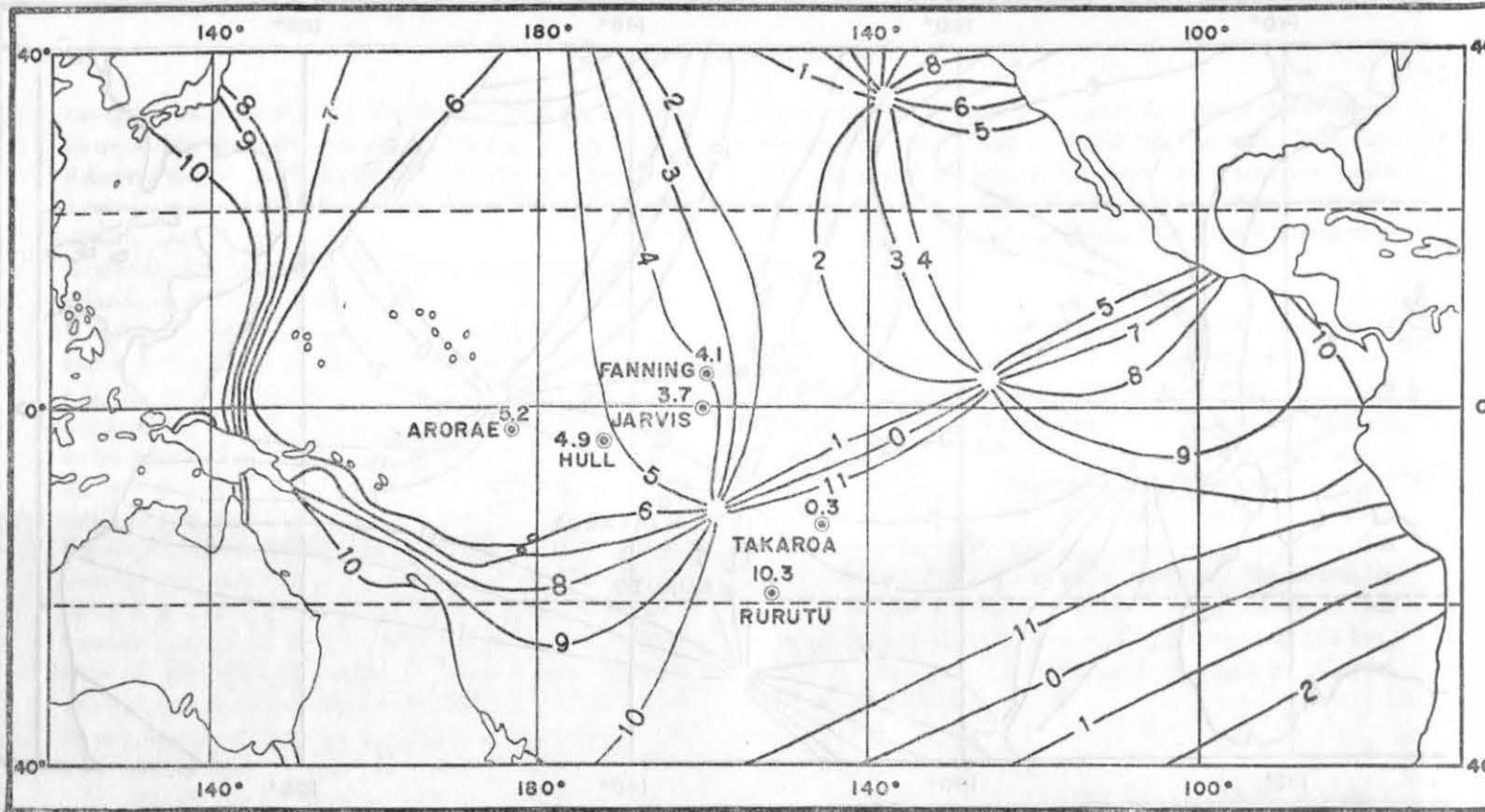


Fig. 2a. Curvas cotidales (en horas componente) de la componente de marea  $S_2$  en el Pacífico Ecuatorial (referidas a Greenwich) tomadas de Bogdanov (1961a). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 2a. Cotidal curves (in constituent hours) of the  $S_2$  constituent in the Equatorial Pacific (referred to Greenwich), taken from Bogdanov (1961a). The six new values herein described are indicated by black dots.

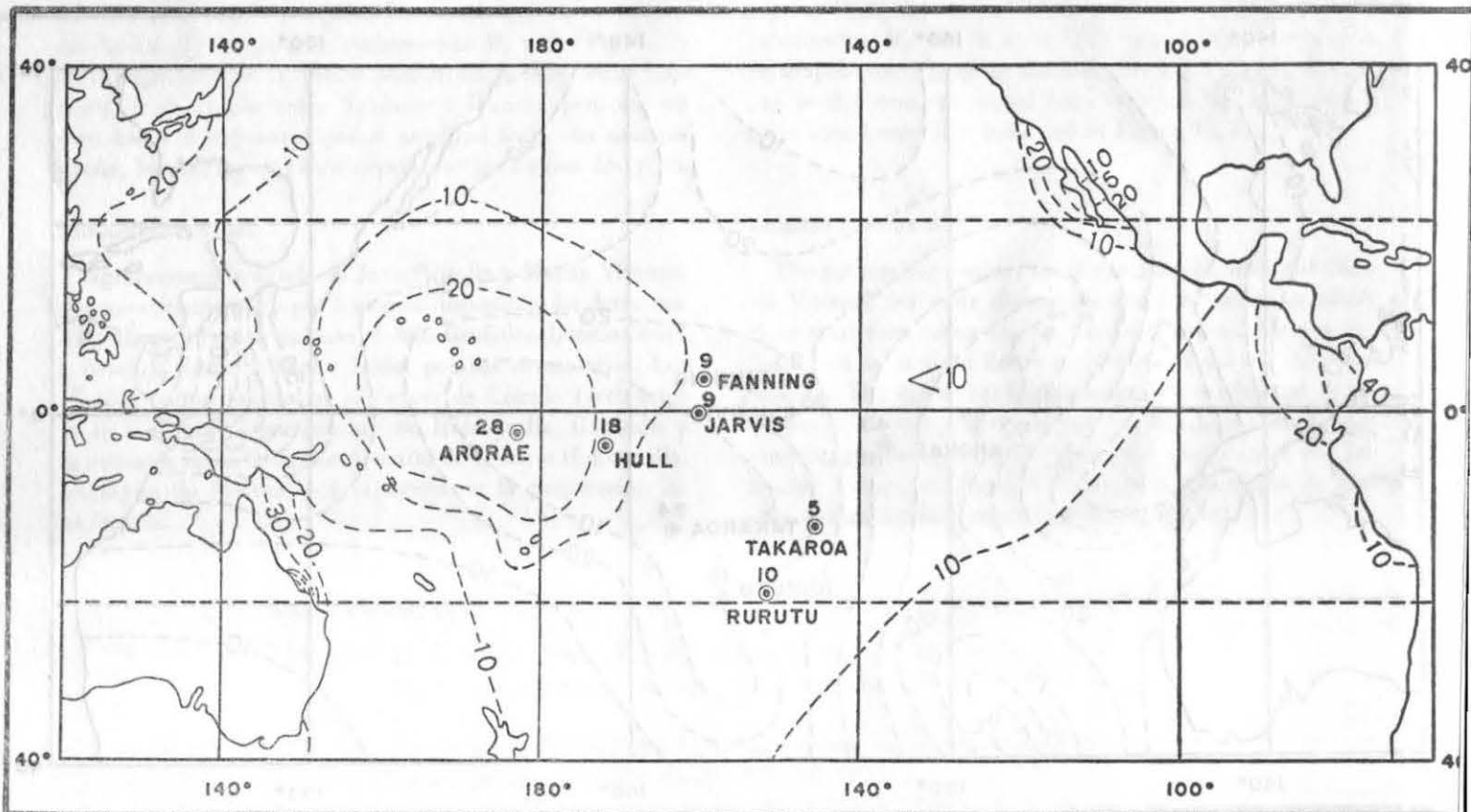


Fig. 2b. Curvas Isoamplitudes (cm.) de la componente de Marea  $S_2$  en el Pacífico Ecuatorial, tomadas de Bogdanov (1961a). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 2b. Curves of equal amplitude (cm.) for the  $S_2$  constituent in the Equatorial Pacific, taken from Bogdanov (1961a). The six new values herein described are indicated by black dots.

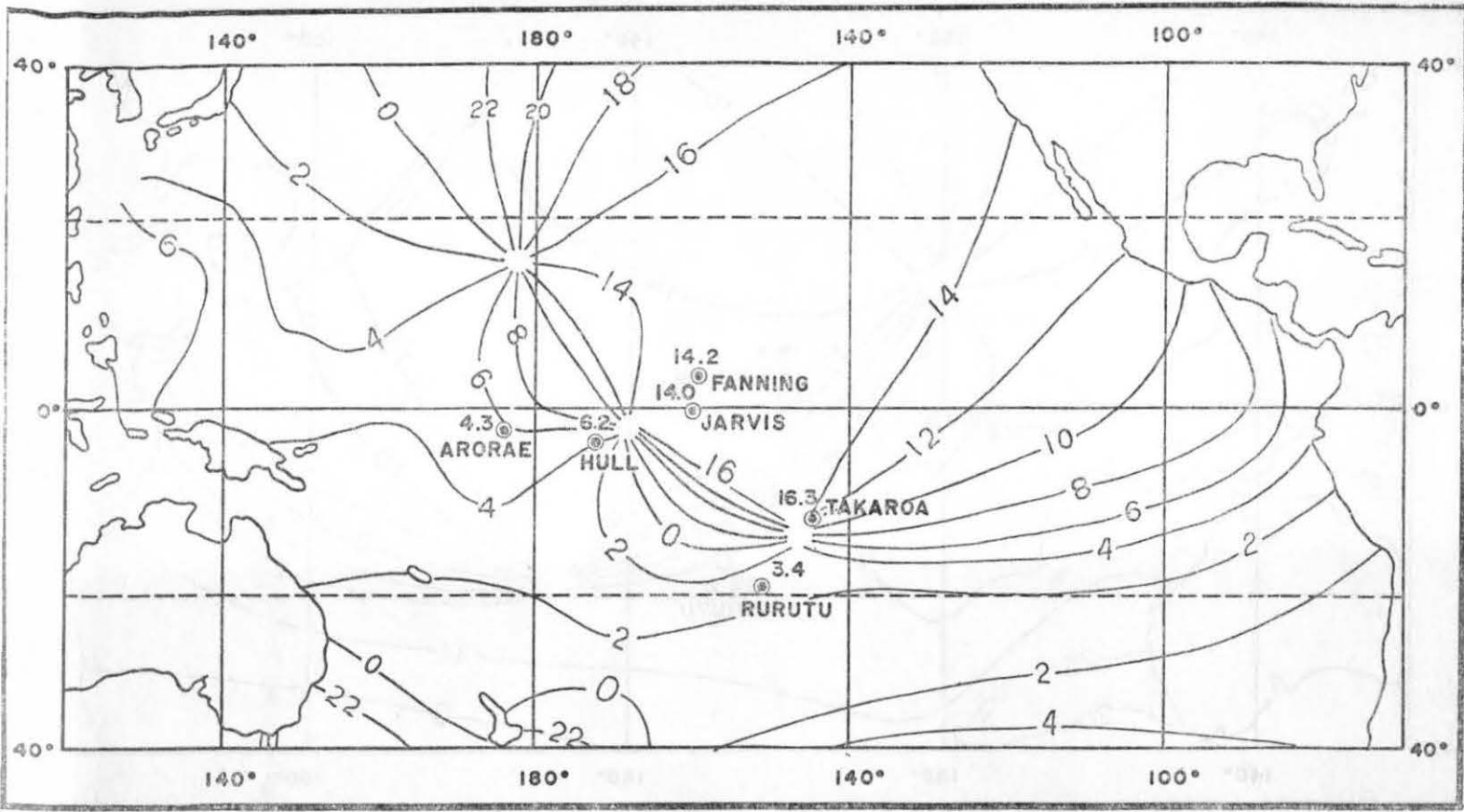


Fig. 3a. Curvas cotidales (en horas componente) de la componente de marea  $K_1$  en el Pacífico Ecuatorial (referidas a Greenwich) tomadas de Bogdanov (1961b). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 3a. Cotidal curves (in constituent hours) of the  $K_1$  constituent in the Equatorial Pacific (referred to Greenwich), taken from Bogdanov (1961b). The six new values herein described are indicated by black dots.

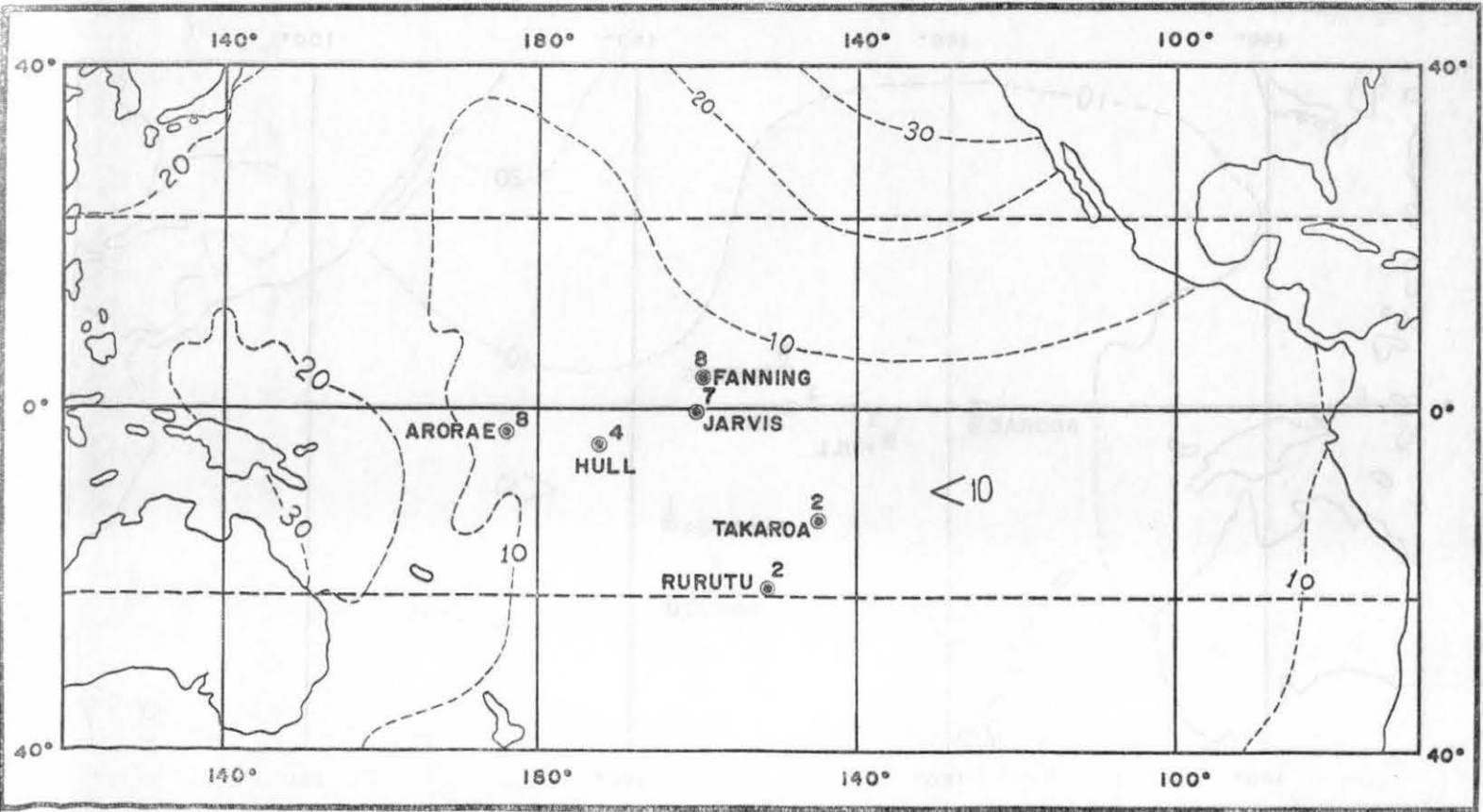


Fig. 3b. Curvas de isoamplitudes (cm.) de la componente de marea  $K_1$  en el Pacífico Ecuatorial tomadas de Bogdanov (1961b). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 3b. Curves of equal amplitude (cm.) for the  $K_1$  constituent in the Equatorial Pacific, taken from Bogdanov (1961b). The six new values herein described are indicated by black dots.

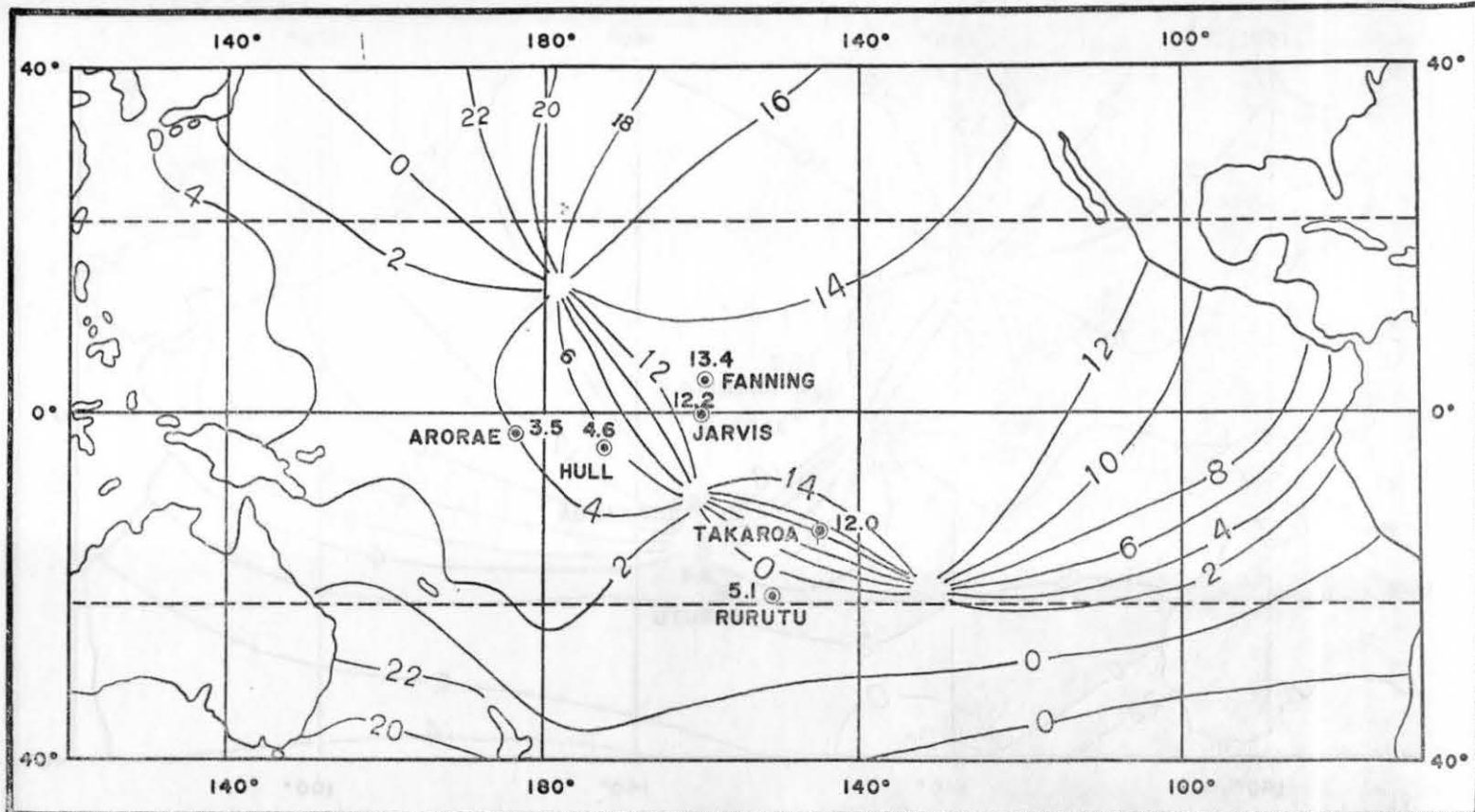


Fig. 4a. Curvas cotidales (en horas componente) de la componente de marea  $O_1$  en el Pacífico Ecuatorial (referidas a Greenwich) tomadas de Bogdanov (1961b). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 4a. Cotidal curves (in constituent hours) of the  $O_1$  constituent in the Equatorial Pacific (referred to Greenwich), taken from Bogdanov (1961b). The six new values herein described are indicated by black dots.

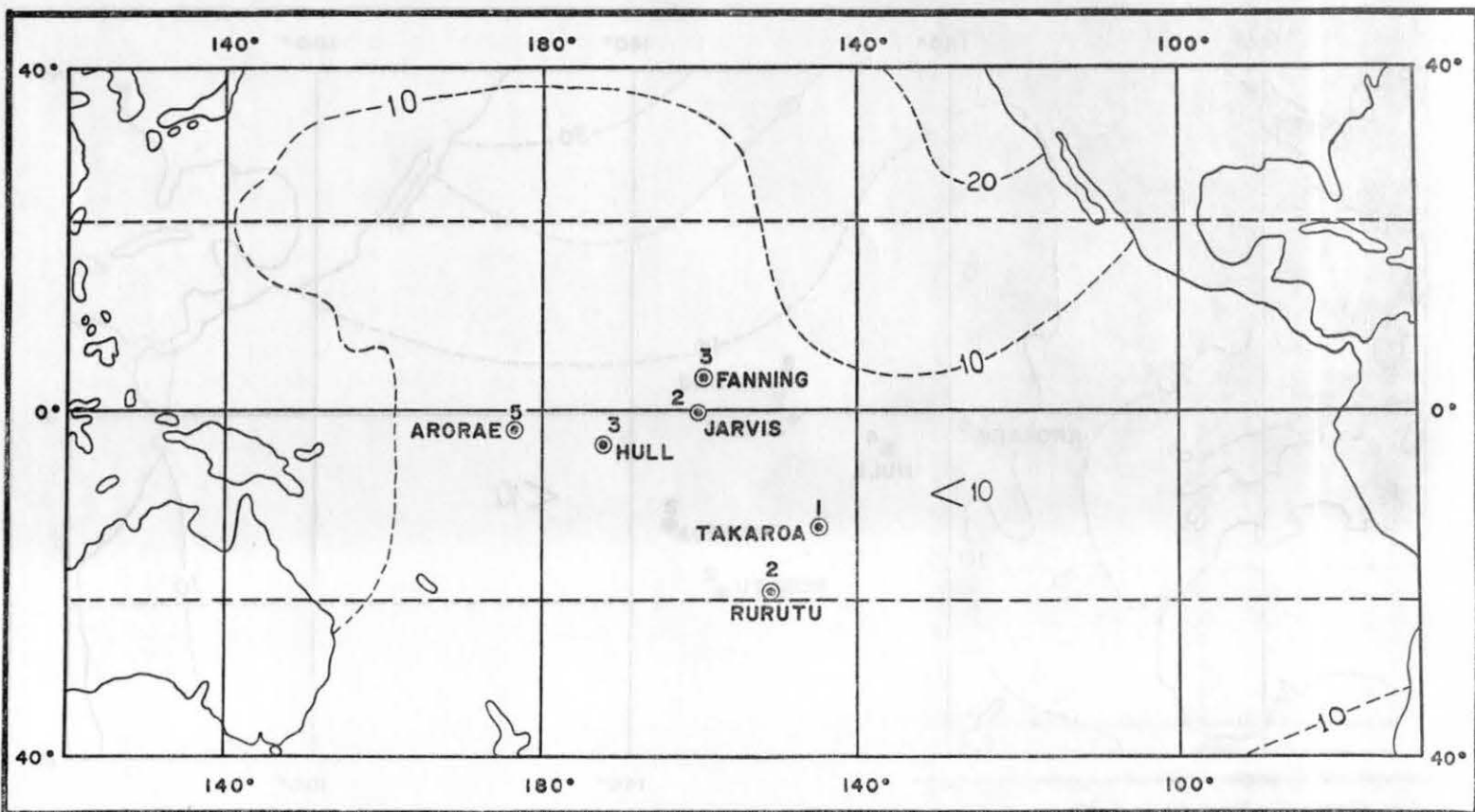


Fig. 4b. Curvas de isoamplitudes (cm.) de la componente de marea  $O_1$  en el Pacífico Ecuatorial, tomadas de Bogdanov (1961b). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 4b. Curves of equal amplitude (cm.) for the  $O_1$  constituent in the Equatorial Pacific, taken from Bogdanov (1961b). The six new values herein described are indicated by black dots.



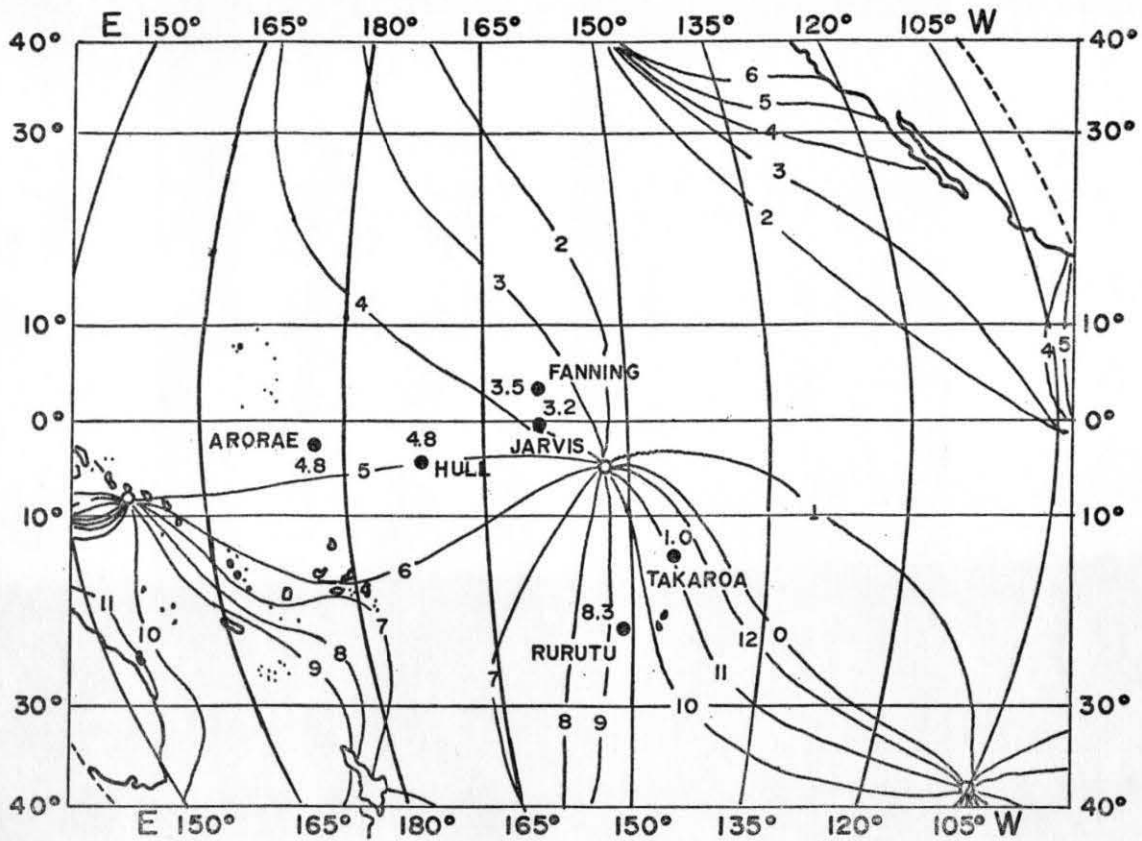


Fig. 5. Curvas cotidales (en horas componente) de la componente  $M_2$  en el Pacífico Ecuatorial (referidas a Greenwich) tomadas de Dietrich (1944). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 5. Cotidal curves (in constituent hours) of the  $M_2$  constituent in the Equatorial Pacific (referred to Greenwich), taken from Dietrich (1944). The six new values herein described are indicated by black dots.

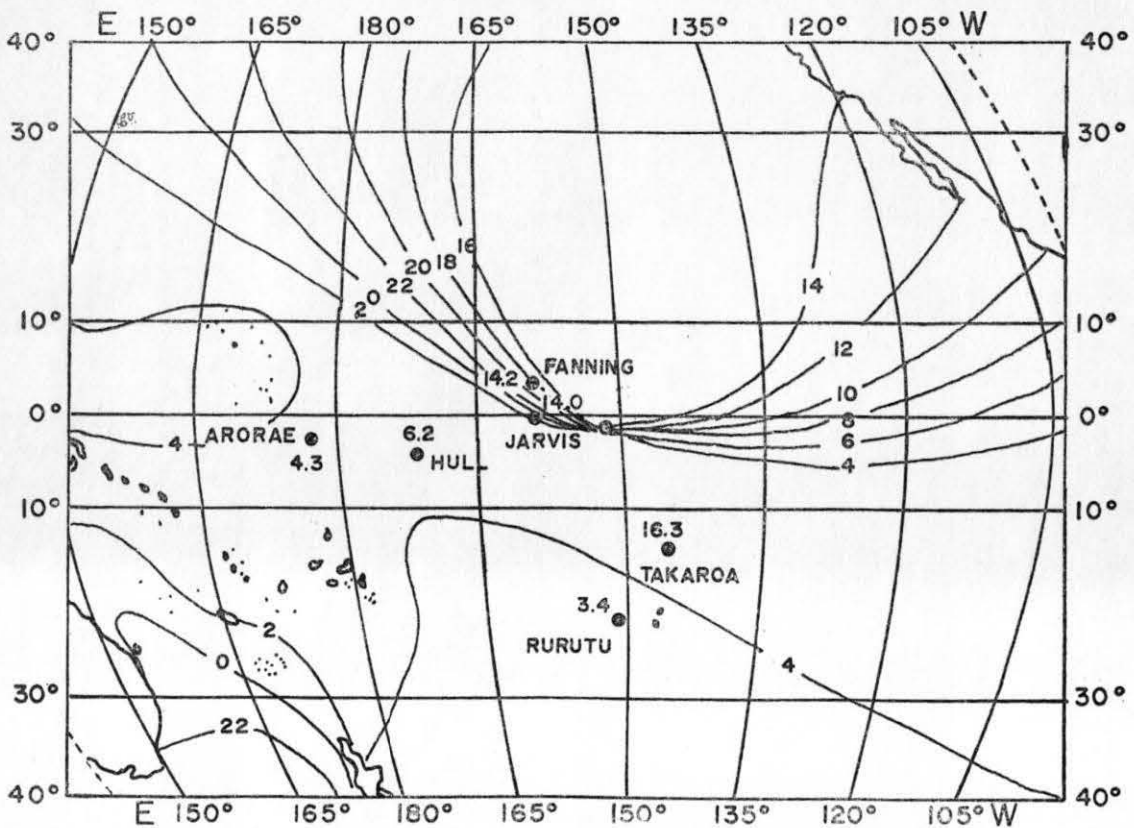


Fig. 6. Curvas cotidales (en horas componente) de la componente  $K_1$  en el Pacífico Ecuatorial (referidas a Greenwich) tomadas de Dietrich (1944). Los seis nuevos valores descritos aquí están indicados por círculos negros.

Fig. 6. Cotidal curves (in constituent hours) of the  $K_1$  constituent in the Equatorial Pacific (referred to Greenwich), taken from Dietrich (1944). The six new values herein described are indicated by black dots.