

DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD DE LA ALTURA DEL OLEAJE DENTRO DE LA BAHIA DE TODOS SANTOS, B.C., MEXICO

PROBABILITY DISTRIBUTION OF WAVE HEIGHT IN TODOS SANTOS BAY, B.C., MEXICO

Asdrúbal Martínez-Díaz de León
Pablo Coria-Méndez

Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, Baja California, México

Recibido en enero de 1993; aceptado en marzo de 1993

RESUMEN

Se analiza la altura significativa del oleaje medido de agosto de 1986 a julio de 1989, dentro de la Bahía de Todos Santos, B.C. México. El análisis muestra un comportamiento estacional, con las máximas alturas en invierno (2.4 m), y las mínimas en verano (0.2 m). La distribución de probabilidad de las alturas es comparada con las distribuciones de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh, para estimar la ola de diseño con periodos de retorno de 50 y 100 años. En todos los casos, la distribución de Fisher-Tippett I presentó los mejores ajustes en el sentido de cuadrados mínimos. Con esta distribución, se obtuvieron alturas de 3.41 y 3.76 m para periodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente.

ABSTRACT

The significant wave height of waves recorded from August 1986 to July 1989, at a station located in Todos Santos Bay, B.C., Mexico, is analysed. The results show a seasonal variation. The maximum value (2.4 m) occurred in winter and the minimum (0.2 m) in summer. The probability distribution of significant wave height is tested with the theoretical distributions of Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh. The best fit is shown by the Fisher-Tippett I probability density function. This function is also used to estimate the significant wave height of 50 and 100-year return periods, giving 3.41 and 3.76 m, respectively.

INTRODUCCION

Una de las mayores fuerzas a las que están expuestas las estructuras costeras es la del embate de las olas. De manera que, al diseñar estas estructuras es vital considerar los diferentes aspectos que permiten caracterizar el patrón del oleaje que incide sobre ellas. Un paso importante hacia esta caracterización, es definir la ola de diseño, para lo cual se requiere analizar los registros de oleaje tomados durante al menos un año en el sitio de interés, además de involucrar la selección y ajuste de una distribución de probabilidad adecuada a las alturas de oleaje y extrapolar para definir la correspondiente altura de

INTRODUCTION

One of the strongest forces to which offshore structures are exposed is the dashing of waves. Therefore, the design of these structures must take into consideration all aspects that characterize the wave pattern. An important step towards this characterization is to define the design wave, for which it is necessary to analyse wave data obtained over a period of at least one year at the site of interest, and to select and fit an appropriate probability distribution to the wave heights and extrapolate to define the corresponding design height. However, despite the importance of the fitting method, there are no

diseño. Sin embargo, no obstante la importancia del procedimiento de ajuste, se carece de bibliografía sobre evidencia física, teórica o empírica para seleccionar la función de distribución de probabilidad adecuada en el cálculo de alturas extremas. El procedimiento utilizado comúnmente es probar varios tipos de distribuciones y seleccionar la que mejor se ajuste a los datos (Carter *et al.*, 1986).

El propósito de este trabajo es probar el ajuste de las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh a las alturas de oleaje medidas de agosto de 1986 a julio de 1989, frente al rompeolas que protege al puerto de Ensenada, B.C. (México) y, con la que mejor se ajuste en el sentido de cuadrados mínimos, calcular la ola de diseño para periodos de retorno de 50 y 100 años.

DATOS

La Bahía de Todos Santos se encuentra localizada en la costa occidental de la Península de Baja California, entre las latitudes $31^{\circ} 41'$ y $31^{\circ} 56'$ N y las longitudes 116° y $116^{\circ} 51'$ O (Fig. 1). Los límites naturales que le dan una forma trapezoidal son: Punta San Miguel, al norte, y las Islas Todos Santos y Punta Banda, al sur. La configuración batimétrica de la Bahía es irregular (Fig. 2). Sus rasgos sobresalientes son: el bajo de San Miguel, con una profundidad promedio de 5.5 m, ubicado entre Punta San Miguel y las islas, y un cañon submarino entre Punta Banda y las islas, con profundidad máxima de 550 m.

La información de oleaje analizada en este trabajo fue obtenida en la estación Rompeolas 1 (Fig. 1). En ésta, se instaló un medidor de presión autónomo, tipo 635-08 de la compañía Sea-Data, con exactitud de 0.1 cm (mayores detalles en Martínez-Díaz de León y Nava-Button, 1987b). Dicho medidor se montó en una estructura de aluminio sobre el fondo, a una profundidad promedio de 10 m.

Del 17 de agosto de 1986 al 28 de enero de 1987, el aparato grabó registros de 2048 datos cada ocho horas, con un intervalo de muestreo de 0.5 s. A partir del 29 de enero y hasta el 30 de julio de 1989 las series se grabaron cada seis horas, con la misma longitud e igual intervalo de muestreo.

physical, theoretical or empirical, bases to select the appropriate probability distribution function in the calculation of extreme heights. The method commonly used is to test several types of distributions and select the one that best fits the data (Carter *et al.*, 1986).

The aim of this study is to test the fit of the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions to the wave heights recorded from August 1986 to July 1989, off the breakwater that protects the port of Ensenada, Baja California (Mexico), and calculate the design wave for 50 and 100-year return periods with the best least squares fit.

DATA

Todos Santos Bay ($31^{\circ}41'-31^{\circ}56'$ N; $116^{\circ}-116^{\circ}51'$ W) is located on the western coast of the peninsula of Baja California (Fig. 1). The natural limits that give it a trapezoidal shape are: Punta San Miguel, to the north, and Todos Santos Islands and Punta Banda, to the south. The bathymetric configuration of the bay is irregular (Fig. 2). Its outstanding features are: San Miguel seamount, with a mean depth of 5.5 m, located between Punta San Miguel and the islands, and a submarine canyon between Punta Banda and the islands, with a maximum depth of 550 m.

The wave data analysed in this study were obtained at station Rompeolas 1 (Fig. 1), where an autonomous pressure meter (Sea-Data, model 635-08) with 0.1 cm precision was installed (further details in Martínez-Díaz de León and Nava-Button, 1987b). This meter was mounted on an aluminium structure at the bottom, at an average depth of 10 m.

From 17 August, 1986 to 28 January, 1987, the instrument recorded 2,048 data every eight hours, with a sampling interval of 0.5 s. From 29 January to 30 July, 1989, the series were recorded every six hours, with the same length and sampling interval.

A total of 3,546 records were analysed in time and frequency, using the software package Sacado developed by Martínez-Díaz de León and Nava-Button (1987a). Only the significant wave height data (H_s : arithmetic mean of the highest one-third of all the waves on the record) were used.

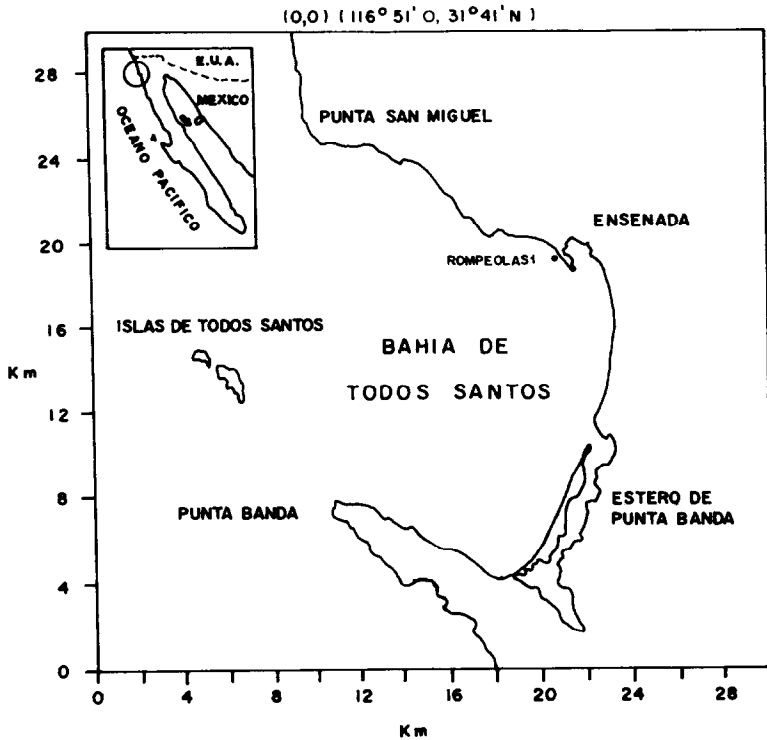


Figura 1. Area de estudio.
Figure 1. Study area.

Un total de 3546 registros fueron finalmente analizados en el dominio del tiempo y la frecuencia, utilizando el paquete de programas Sacado de Martínez-Díaz de León y Nava-Button (1987a). Sin embargo, en el caso particular de este trabajo, sólo se utilizó la información de la altura significativa (H_S : promedio aritmético del tercio mayor en la serie de alturas en un registro) de cada registro.

TEORIA

Distribuciones de probabilidad

Con el propósito de caracterizar la distribución de probabilidad de las alturas significantes consideradas en este trabajo, se utilizaron las distribuciones de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh. La selección de estas distribuciones se debió a que son de las más familiares dentro

THEORY

Probability distributions

In order to characterize the probability distribution of significant wave height, the theoretical probability distributions of Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh were used. These distributions were selected because they are the most familiar in coastal engineering and because, in most cases, they adequately describe wave heights (Wyland *et al.*, 1991). The methodology used to fit the probability distributions to the data is similar to that used by Isaacson and MacKenzie (1981) and Muir and El-Shaarawi (1986), where the best fit and the determination of the parameters of each distribution are obtained with the least squares method.

Henceforth, the cumulative probability distribution function, $P(H) = Prob(H(t) \leq H)$, will be the probability that a randomly

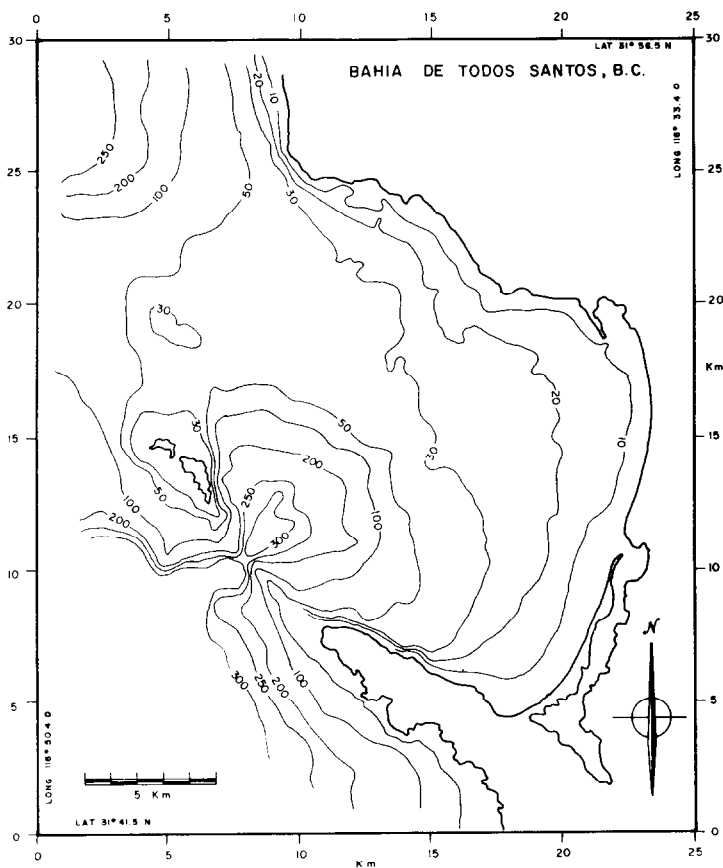


Figura 2. Configuración batimétrica de la Bahía de Todos Santos.
Figure 2. Bathymetric configuration of Todos Santos Bay.

de la ingeniería costera y a que, en la mayoría de los casos, tienden a describir adecuadamente las alturas del oleaje (Wyland *et al.*, 1991). La metodología utilizada para ajustar los datos a las distribuciones de probabilidad es similar a la usada por Isaacson y MacKenzie (1981) y Muir y El-Shaarawi (1986), donde el mejor ajuste, así como la determinación de los parámetros de cada una de las distribuciones, se obtiene con el método de cuadrados mínimos.

En lo sucesivo, la función de distribución de probabilidad acumulativa, $P(H) = \text{Prob}(H(t) \leq H)$, será la probabilidad de que el argumento H no sea excedido por ningún valor $H(t)$ escogido aleatoriamente, y la función de densidad de probabilidad, será $p(H) =$

chosen $H(t)$ value does not exceed H , and $p(H) = dP(H)/dH$ will be the probability density function. To describe the distributions it is convenient to adopt the following notation: α = shape parameter, that determines the basic shape of a particular distribution; β = position parameter, which locates the density function in the abscissa (axis of the variable).

The expressions $P(H)$, that define the different distributions considered in this study, and their respective mean and variance expressions are given in table 1.

It is common to plot the cumulative probability distribution in such a way that it resembles a straight line, thus enabling a visual fit when appropriate. This can be done

Tabla 1. Descripción de las funciones de distribución de probabilidad utilizadas en este trabajo.
Table 1. Description of the probability distribution functions used in this study.

Distribución	$P(H)$	Media	Varianza
F-T I	$\exp\{-\exp[-(H-\alpha)/\beta]\}$	$\alpha + \gamma\beta$ ($\gamma = \text{cte. Euler}$)	$\beta^2\pi^2/6$
Weibull	$1 - \exp[-(H/\alpha)^\beta]$	$\alpha\Gamma[\beta^{-1} + 1]$ ($\Gamma = F. Gamma$)	$\alpha^2[\Gamma(2\beta^{-1} + 1) - \{\Gamma(\beta^{-1} + 1)\}^2]$
Rayleigh	$1 - \exp(-H^2/2\alpha^2)$	$\sqrt{\pi}\alpha$	$2\alpha^2(1 - \pi^2/2)$

Tabla 2. Relación entre las escalas lineales y el papel probabilidad correspondiente a cada distribución.

Table 2. Relationship between the linear scales and the probability paper corresponding to each distribution.

Distribución	Escala abscisa x	Escala ordenada y
F-T I	H	$-\ln\{-\ln[p(H)]\}$
Weibull	$\ln(H)$	$\ln(-\ln[1-p(H)])$
Rayleigh	$\ln(H)$	$\ln(-\ln[1-p(H)])$

$dP(H)/dH$. Para describir las distribuciones es conveniente adoptar la siguiente notación en los parámetros utilizados para definir cualquier distribución en particular: α = parámetro formal que determina la forma básica de una distribución en particular; β = parámetro de ubicación, el cual ubica la función de densidad en la abscisa (eje de la variable).

La tabla 1 muestra las expresiones para la $P(H)$ que define a las diferentes distribuciones consideradas en este trabajo; también incluye expresiones para sus respectivas media y varianza.

Es una práctica común graficar la distribución de probabilidad acumulativa de manera que se asemeje a una línea recta, ya que esto ayuda a visualizar el procedimiento de extrapolación y permite un ajuste visual cuando resulta adecuado. Por lo anterior, debe seleccionarse como primer paso el papel probabilidad adecuado, o realizar la transforma-

either by using the correct probability paper or by suitably transforming the scales. The linear scale of the ordinates y , is related to the cumulative probability $P(\cdot)$, and the linear scale of the abscissa x , is related to the variable H , in accordance with the relations presented in table 2. In this way, there is a linear relationship between x and y , $y = ax + b$, with slope a and intercept b which are given in terms of the parameters, α and β , as indicated in table 1.

Return period

The main objective of fitting a probability distribution function to wave height data, is to predict the height of the design wave corresponding to a certain return period. The return period (or time of recurrence) of a given height, T_R , is the average interval of time during which this height is equalled or exceeded. The height of the wave chosen for

ción de escalas correspondiente, de forma que se cumpla con este requerimiento. La escala lineal de las ordenadas, y , está relacionada con la probabilidad acumulativa, $P(\cdot)$, y la escala lineal de la abscisa, x , está relacionada con la variable, H , de acuerdo con las relaciones presentadas en la tabla 2. De esta forma, existe una relación lineal $y = ax + b$, entre x y y con pendiente a y ordenada en el origen b , relacionados con los parámetros α y β en la forma que indica la tabla 1.

Periodo de retorno

El principal objetivo del ajuste de funciones de distribución de probabilidad a datos de altura de oleaje, es pronosticar la altura de la ola de diseño correspondiente a determinado periodo de retorno. El periodo de retorno (o tiempo de recurrencia) de una altura dada, T_R , es el intervalo promedio de tiempo en el que tal altura es igualada o excedida. La altura de la ola seleccionada para este propósito deberá ser definida inicialmente en la misma forma que las alturas de las olas de los registros de oleaje analizados (por ejemplo, la altura significativa en un cierto intervalo de medición, como es el caso de este trabajo, o la altura máxima probable de una tormenta en particular). El periodo de retorno dentro de una escala de tiempo, puede ser expresado como:

$$T_R = \frac{\Delta t}{1 - P(H)}$$

donde Δt corresponde al intervalo de tiempo transcurrido entre dos eventos, los cuales se supone que no están correlacionados.

Se puede ver que cada periodo de retorno tiene asociado un valor de $P(H)$, y que la correspondiente altura de oleaje puede ser determinada (extrapolando) a partir de la distribución con mejor ajuste.

Existen básicamente tres métodos para calcular el periodo de retorno: ajustar todos los datos a la distribución de probabilidad teórica, ajustar la cola en la que se encuentran los mayores valores de los datos y ajustar sólo los valores extremos. En ocasiones, es común observar que la distribución que ajusta el grueso de los datos no ajusta la cola superior o viceversa. Ochi (1982) propone, para este tipo de casos, utilizar una función de cuatro

this purpose should be initially defined in the same way as the heights of waves analysed (for example, significant wave height in a certain sampling interval, as is the case in this study, or the probable maximum height of a particular storm). The return period can be expressed as:

$$T_R = \frac{\Delta t}{1 - P(H)}$$

where Δt corresponds to the interval of time elapsed between two events, which are assumed to be uncorrelated.

It can be seen that each return period has a $P(H)$ value associated to it, and that the corresponding wave height can be determined (by extrapolating) from the distribution that best fits the data.

There are basically three methods to calculate the return period: to fit the theoretical probability distribution to all the data, to the tail containing the highest values or to the extreme values only. At times, it is common to find that the distribution that fits most of the data does not fit the upper tail or vice versa. Ochi (1982) proposes, in these cases, that a function of four parameters, more complicated than the ones used in this study, be employed.

RESULTS AND DISCUSSION

In order to characterize the seasonal regime of waves, the information analysed was classified according to the different seasons. Table 3 shows the months that define each season, as well as the number of heights included in each. The difference in the amount of data is due to the fact that the sampling interval was not the same throughout the study period (see section on data). This difference coincides precisely with autumn.

For each season and for the total data, histograms of frequency of occurrence were calculated, using a class interval of 0.1 m, as shown in Figs. 3 to 7. The minimum, maximum and modal values of H_S and their respective percentages of occurrence are presented in table 4, for each of the histograms. In general, the highest waves occurred in winter, reaching a significant height of 2.4 m. This was to be expected, as it is precisely

Tabla 3. Meses considerados para definir las diferentes épocas del año y número de alturas incluidas en cada una de las mismas.

Table 3. Months that define the different seasons and number of heights included in each.

Epoca	Meses incluidos	No. de H
Primavera	marzo - mayo	1063
Verano	junio - agosto	876
Otoño	septiembre - noviembre	784
Invierno	diciembre - febrero	823
Todas		3546

Tabla 4. Valores mínimos, máximos y modales de los histogramas de H_S y sus respectivos porcentajes de ocurrencia, para cada una de las diferentes épocas consideradas.

Table 4. Minimum, maximum and modal values of the histograms of H_S and their respective percentages of occurrence, for each season.

Epoca	Mínimo	%	Máximo	%	Modal	%
Primavera	0.3	0.28	2.2	0.09	0.6	19.5
Verano	0.2	0.34	1.3	0.11	0.5	33.5
Otoño	0.3	3.95	1.8	0.26	0.5	20.3
Invierno	0.3	0.49	2.4	0.24	0.7	15.9
Todas	0.2	0.08	2.4	0.06	0.5	18.5

parámetros más complicada que las utilizadas en este trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para poder caracterizar de una manera conveniente el régimen estacional del oleaje, se clasificó la información analizada de acuerdo con las diferentes épocas del año. La tabla 3 muestra los meses que se consideraron para definir cada época, así como el número de alturas que incluyeron. La diferencia en la cantidad de datos se debió a que no se tuvo un intervalo de muestreo similar a lo largo de todo el periodo de medición (ver la sección correspondiente a datos). Esta diferencia coincide precisamente con la época de otoño.

Para cada época del año y para el total de datos, se calcularon histogramas de frecuencia de ocurrencia, utilizando un intervalo de clase de 0.1 m, como se muestra en las Figs. 3 a 7. En la tabla 4 se presentan, para cada uno de estos histogramas, los valores de H_S

during this time of year when extratropical storms form in the northwestern North Pacific. The smallest significant wave heights occurred in summer, with 0.2 m. Autumn and spring are considered transition periods. In autumn, the H_S values begin to increase, relative to those observed in summer, until reaching maximum heights in winter. In spring, on the other hand, there is a decrease in heights which leads to low values in summer. These results concur with the behaviour of the wave heights reported by Martínez-Díaz de León *et al.* (1989), who analysed only the first year of the data considered in the present study (September 1986 to August 1987). This could indicate that in an annual cycle, typical for the study area, waves have a behaviour pattern as described herein.

An important characteristic in all the histograms presented is the unimodal distribution, which facilitated the fit of the theoretical probability functions. The theoretical probability distributions of Fisher-Tippett I,

PRIMAVERA
MARZO A MAYO DE 1987, 88, 89.

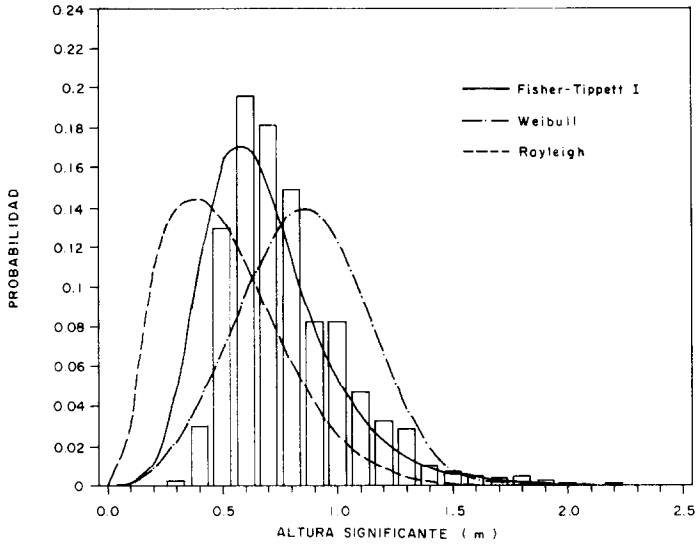


Figura 3. Distribución de probabilidad de ocurrencia de H_S para la época de primavera y su comparación con las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh.

Figure 3. Probability distribution of occurrence of H_S for spring and its comparison with the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions.

VERANO
JUNIO A AGOSTO DE 1986, 87, 88, 89.

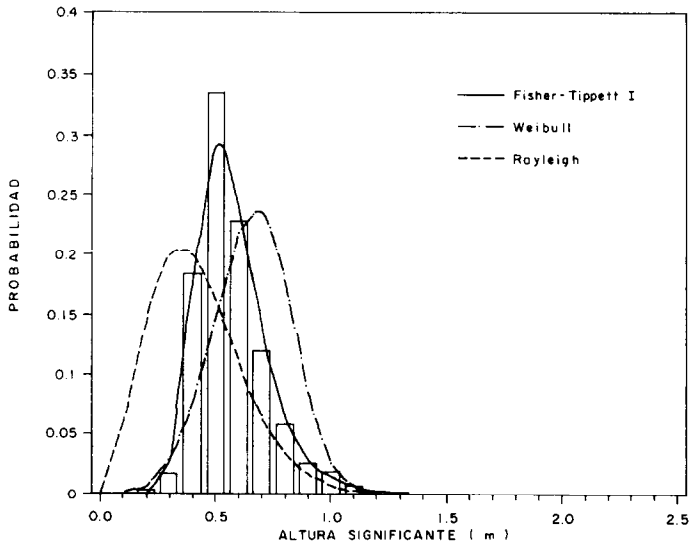


Figura 4. Distribución de probabilidad de ocurrencia de H_S para verano y su comparación con las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh.

Figure 4. Probability distribution of occurrence of H_S for summer and its comparison with the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions.

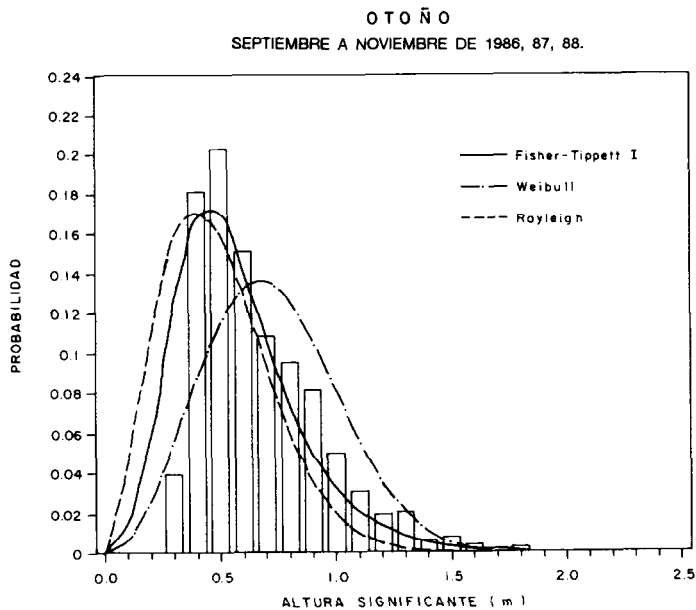


Figura 5. Distribución de probabilidad de ocurrencia de H_S para otoño y su comparación con las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh.

Figure 5. Probability distribution of occurrence of H_S for autumn and its comparison with the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions.

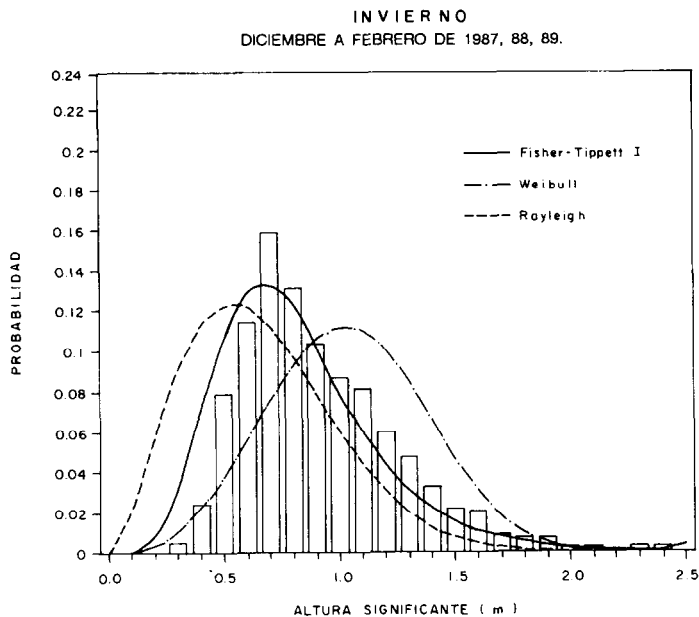


Figura 6. Distribución de probabilidad de ocurrencia de H_S para invierno y su comparación con las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh.

Figure 6. Probability distribution of occurrence of H_S for winter and its comparison with the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions.

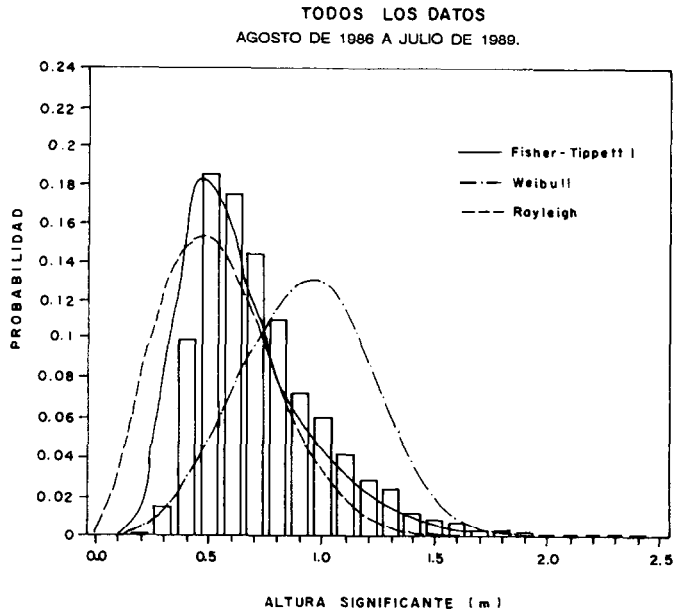


Figura 7. Distribución de probabilidad de ocurrencia de H_s para todos los datos y su comparación con las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh.
Figure 7. Probability distribution of occurrence of H_s for all the data and its comparison with the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions.

mínimos, máximos, modales y sus respectivos porcentajes de ocurrencia. En general, se encontró que el oleaje de mayor altura se presenta en invierno y alcanza hasta 2.4 m de altura significativa. Esto era de esperarse, ya que es precisamente en esta época cuando se forman las tormentas extratropicales al noroeste del Pacífico Norte. Las alturas significativas más pequeñas se presentaron en el verano, con 0.2 m. Otoño y primavera se consideran épocas de transición, ya que en otoño los valores de H_s comienzan a incrementarse, en comparación con los observados en el verano, hasta alcanzar las máximas alturas en invierno, y en primavera, caso contrario, se presenta un decremento en las alturas, que da lugar a los pequeños valores del verano. Estos resultados concuerdan con el comportamiento de las alturas del oleaje reportado por Martínez-Díaz de León *et al.* (1989), quienes analizan únicamente el primer año de la información considerada en este trabajo (septiembre de 1986 a agosto de 1987). Esto podría estar indicando que en un ciclo anual típico para la zona de estudio el oleaje tiene el comportamiento descrito.

Weibull and Rayleigh are presented in Figs. 3 to 7. Since no comparison between the figures is made, the vertical scale of Fig. 4 was modified for a better presentation. The correlation coefficients obtained in the fits of the probability distribution functions are given in table 5, which shows that the best fit for all the data was attained with the Fisher-Tippett I distribution. This function was therefore chosen to extrapolate to 50 and 100-year return periods.

Figs. 8 to 12 show, with the corresponding transformation of axes, the cumulative probability distributions for the different seasons. On each of these figures, the straight line corresponding to the least squares fit is also drawn and extrapolated to the return periods desired. The wave height values obtained by the extrapolation are presented in table 6.

As expected, based on the histograms presented, the highest design heights were obtained for winter, with 3.74 m for a 50-year return period and 3.97 m for a 100-year return period. The lowest design heights occurred in summer, with 1.85 and 1.96 m for 50 and 100 years, respectively. In all cases, the difference

Tabla 5. Coeficientes de correlación obtenidos en el ajuste por cuadrados mínimos de los histogramas y las diferentes funciones de distribución de probabilidad.

Table 5. Correlation coefficients obtained by the least squares fit of the histograms and the different probability distribution functions.

Distribución	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Todas
F-T I	0.83	0.99	0.83	0.89	0.96
Weibull	0.70	0.56	0.76	0.64	0.38
Rayleigh	0.25	0.41	0.63	0.52	0.60

Tabla 6. Alturas significantes con periodos de retorno de 50 y 100 años, obtenidos con la función de distribución de probabilidad de Fisher-Tippett I.

Table 6. Significant heights with 50 and 100-year return periods, obtained with the Fisher-Tippett I probability distribution function.

Epoca	H_{50}	H_{100}
Primavera	3.35	3.70
Verano	1.85	1.96
Otoño	2.82	2.94
Invierno	3.74	3.97
Todas	3.41	3.76

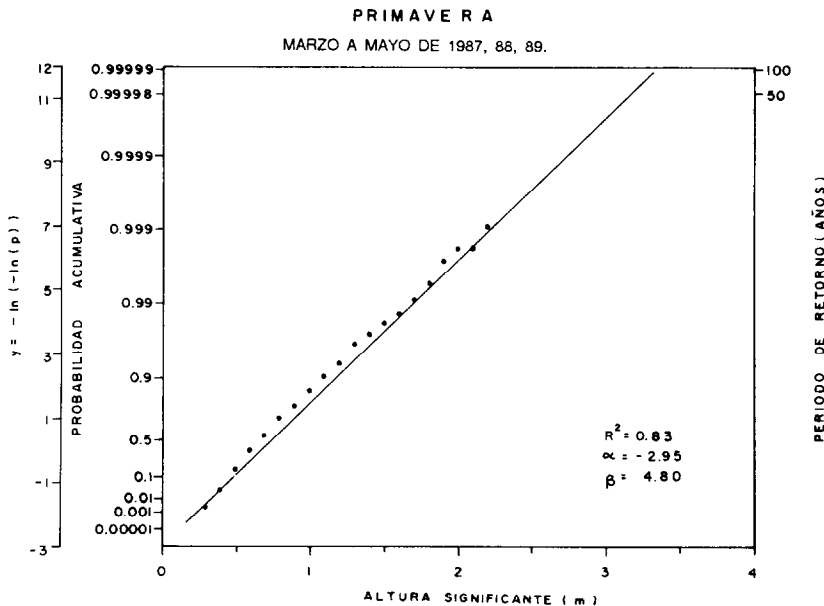


Figura 8. Probabilidad acumulativa de H_S para la época de primavera, utilizando la transformación de ejes de la distribución de probabilidad teórica de Fisher-Tippett I.

Figure 8. Cumulative probability of H_S for spring, using the transformation of axes of the theoretical probability distribution of Fisher-Tippett I.

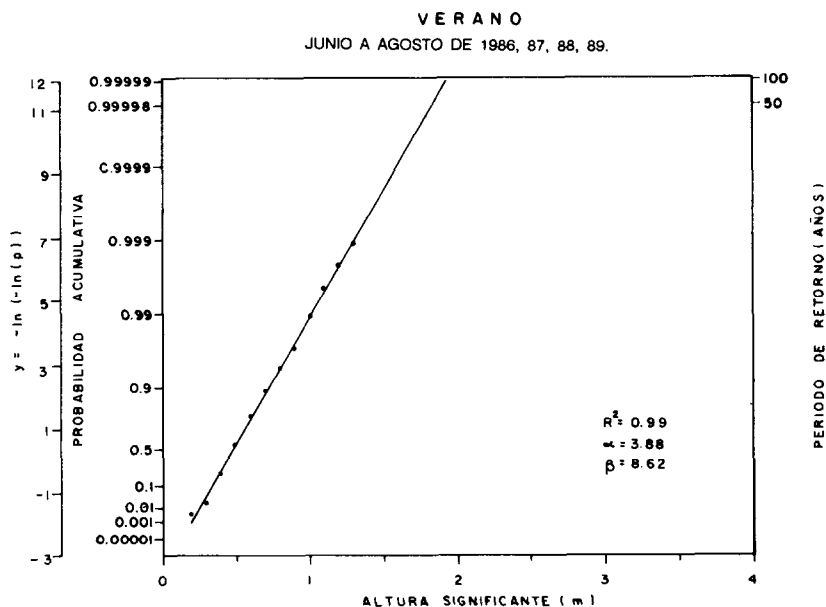


Figura 9. Distribución de probabilidad de ocurrencia de H_s para verano y su comparación con las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh.

Figure 9. Probability distribution of occurrence of H_s for summer and its comparison with the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions.

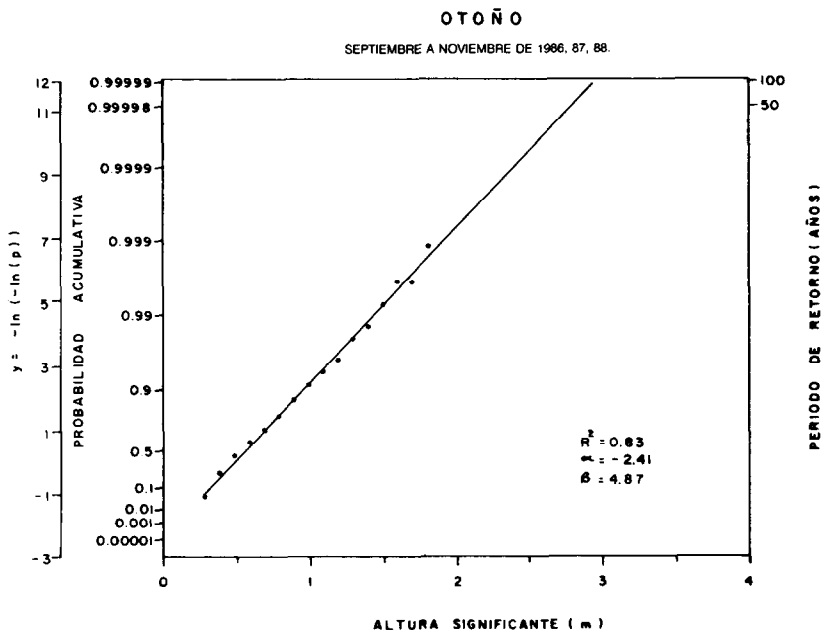


Figura 10. Distribución de probabilidad de ocurrencia de H_s para otoño y su comparación con las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh.

Figure 10. Probability distribution of occurrence of H_s for autumn and its comparison with the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions.

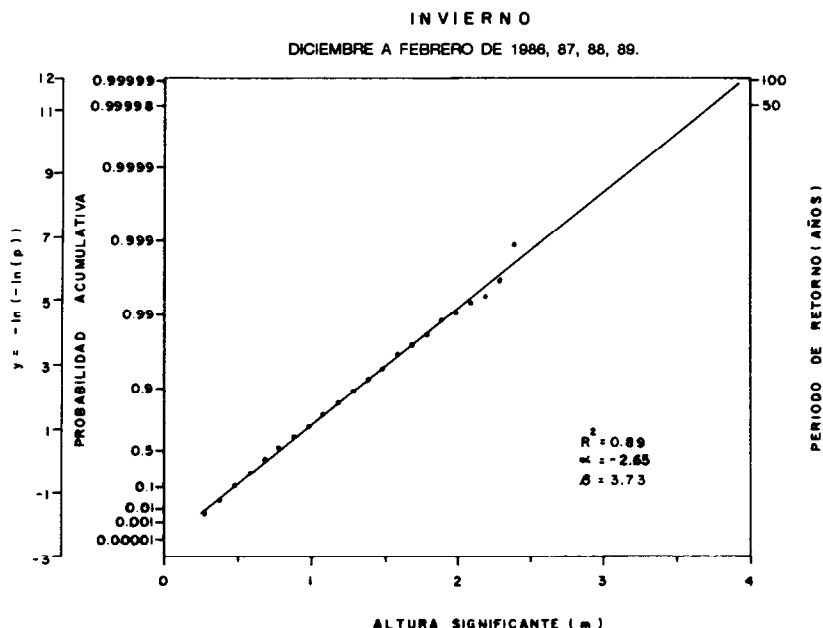


Figura 11. Distribución de probabilidad de ocurrencia de H_S para invierno y su comparación con las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh.

Figure 11. Probability distribution of occurrence of H_S for winter and its comparison with the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions.

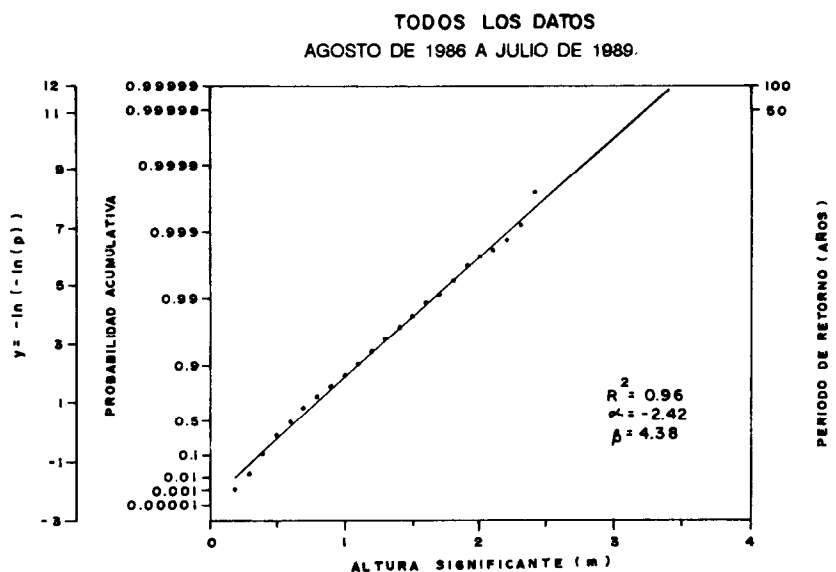


Figura 12. Distribución de probabilidad de ocurrencia de H_S para todos los datos y su comparación con las funciones de distribución de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh.

Figure 12. Probability distribution of occurrence of H_S for all the data and its comparison with the Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh theoretical probability distribution functions.

Una característica importante en todos los histogramas presentados es su distribución unimodal, la cual facilitó el ajuste de las funciones de probabilidad teóricas. En las Figs. 3 a 7 se presentan las distribuciones de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh. Debido a que no se hace alguna comparación entre figuras, se modificó la escala vertical de la Fig. 4 para lograr una mejor presentación. Los coeficientes de correlación obtenidos en el ajuste de las funciones de distribución de probabilidad se presentan en la tabla 5, donde se puede ver que el mejor ajuste para todos los datos se logró con la distribución de Fisher-Tippett I, por lo cual esta función fue la seleccionada para extrapolar a periodos de retorno de 50 y 100 años.

Las Figs. 8 a 12 presentan, con la transformación de ejes correspondiente, las distribuciones de probabilidad acumulativa para cada una de las diferentes épocas del año. A cada una de estas figuras se ha sobrepuesto la línea recta que resultó del ajuste por cuadrados mínimos que, además, ha sido prolongada hasta los periodos de retorno deseados. En la tabla 6 se presentan los valores de altura de ola obtenidos en la extrapolación.

Como era de esperarse con base en los histogramas presentados, la mayor altura de diseño se obtuvo para la época de invierno, y fue 3.74 m para un periodo de retorno de 50 años, y 3.97 m para uno de 100 años. El verano presentó las menores alturas de diseño, 1.85 y 1.96 m para 50 y 100 años, respectivamente. En todos los casos, la diferencia de alturas obtenidas en los periodos de retorno seleccionados resultó menor del 10%, lo cual, de acuerdo con Houmb (1984), es algo común de observar.

No obstante que la mayor altura de diseño calculada resultó ser 3.97 m, es conveniente mantener en mente que la información que se analiza son las alturas significantes, las cuales, como ya se mencionó, se obtienen haciendo un promedio aritmético del tercio mayor en la serie de alturas de un registro. Esto indica que habrá ocurrencia de olas de mayor altura que las reportadas en este trabajo.

Como lo muestran los resultados, en invierno se presentan las mayores alturas de oleaje en la zona de medición, sin embargo, la información analizada no incluye eventos

between the heights obtained for the return periods selected was less than 10% and this, according to Houmb (1984), is common.

Though the maximum design height calculated was 3.97 m, it should be noted that the data analysed are significant wave heights and, as has been mentioned, they are the means of the highest one-third of all the waves on the record. This indicates that waves of greater height than those reported herein will occur.

As shown by the results, in the study area the highest wave heights occurred in winter. However, the information analysed does not include extraordinary events, such as the storm of January 1988, which in principle should be included in this information. The heights observed in open sea (deep waters) were of the order of 10 m (Coastal Data Information Program, 1988), which greatly exceeded the safety devices used to anchor the instrument and it was consequently lost. The fact that at least this extraordinary event was not included in the calculation of the design waves does not greatly change the results because, as indicated by Seymour (1989), the extreme heights recorded in the January 1988 storm are associated with a return period of at least 200 years.

The results presented are in agreement with the heights reported by González and Sánchez (1985), who analysed data recorded by the Coastal Data Information Program (Seymour *et al.*, 1985) between 1975 and 1984. They found that the maximum significant wave height that could have occurred in those years off the breakwater was 3 m, precisely in winter.

CONCLUSIONS

The most complete data set of wave heights in terms of time coverage (three years of information) for Todos Santos Bay, B.C., has been analysed. The significant wave height presented a seasonal cycle. The maximum value, 2.4 m, occurred in winter and the minimum, 0.2 m, in summer

Autumn and spring were characterized as transition periods. In autumn the H_s values begin to increase relative to those observed in summer, until reaching maximum heights in winter. The opposite occurs in spring, when there is a decrease in heights, resulting in lower values during summer.

extraordinarios, como el que se presentó en enero de 1988, y que en principio debería estar incluido en esta información. Las alturas observadas en mar abierto (aguas profundas) resultaron del orden de 10 m (*Coastal Data Information Program*, 1988), lo cual superó por mucho los dispositivos de seguridad utilizados en el anclaje del instrumento, y ocasionó la pérdida del mismo. El hecho de no incluir al menos este último evento extraordinario en el cálculo de las olas de diseño, no cambiaría en mucho los resultados, ya que, como lo indica Seymour (1989), las alturas extremas registradas en la tormenta de enero de 1988 están asociadas con un periodo de retorno de al menos 200 años.

Los resultados presentados concuerdan con las alturas reportadas por González y Sánchez (1985), quienes analizaron información medida por el *Coastal Data Information Program* (Seymour *et al.*, 1985), entre los años 1975 y 1984, y encontraron que la máxima altura significativa que pudo haberse presentado en esos años frente al rompeolas fue de 3 m, precisamente en la época de invierno.

CONCLUSIONES

Se ha analizado la base de datos de alturas de oleaje más completa en lo referente a cobertura temporal (tres años de información) medida dentro de la Bahía de Todos Santos, B.C. Se encontró que la altura significativa del oleaje describe un ciclo estacional, en el que las mayores alturas se presentan en el invierno y las mínimas en el verano, con valores de 2.4 y 0.2 m, respectivamente.

Otoño y primavera se caracterizaron como épocas de transición, ya que en el otoño los valores de H_s comienzan a incrementarse en comparación con los observados en el verano, hasta alcanzar las máximas alturas en el invierno. En primavera sucede lo contrario, se presenta un decremento en las alturas, que da lugar a los pequeños valores del verano.

La distribución de probabilidad observada en los valores de H_s , considerando todos los datos, así como los correspondientes a cada una de las diferentes épocas del año, se comparó con las distribuciones de probabilidad teóricas de Fisher-Tippett I, Weibull y Rayleigh, y se encontró que la función de Fisher-Tippett I es la que mejor se ajusta a los datos en el sentido de cuadrados mínimos.

Las alturas del oleaje para periodos de retorno de 50 y 100 años, utilizando la función

The probability distribution observed in the H_s values, considering all the data as well as those corresponding to each season, was compared to the theoretical probability distributions of Fisher-Tippett I, Weibull and Rayleigh. The Fisher-Tippett I function was found to best (least-squares) fit the data.

Wave heights for 50 and 100-year return periods, using the Fisher-Tippett I function, for the complete set of data, were 3.41 and 3.76 m, respectively. Considering only the data corresponding to winter, heights of 3.74 m were obtained for a 50-year return period and 3.97 m for a 100-year return period.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (grant PCECBNA-021606). The second author received a scholarship from the Universidad Autónoma de Baja California. Eduardo Gil, Rafael Blanco and Sergio Larios helped in obtaining and processing the data. Ramón Moreno drew the figures.

English translation by Christine Harris.

de Fisher-Tippett I y para el conjunto de todos los datos, resultaron ser 3.41 y 3.76 m respectivamente. Considerando únicamente la información correspondiente a la época de invierno, se obtienen alturas de 3.74 m para un periodo de retorno de 50 años, y 3.97 m para uno de 100 años.

AGRADECIMIENTOS

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología proporcionó financiamiento para esta investigación, mediante el convenio PCECBNA-021606. La Universidad Autónoma de Baja California otorgó una beca tesis al segundo autor de este trabajo. Eduardo Gil, Rafael Blanco y Sergio Larios participaron en la toma y procesamiento de la información. Ramón Moreno colaboró dibujando las figuras presentadas.

REFERENCIAS

- Carter, D.J.T., Challenor, P.G., Ewing, J.A., Pitt, E.G., Srokosz, M.A. and Tucker, M.J. (1986). Estimating wave climate

- parameters for engineering applications. **Institute of Oceanographic Sciences**, Offshore Technology Report, OTH 86-22B, 130 pp.
- Coastal Data Information Program (CDIP) (1988). Monthly report, January 1988. **Scripps Institution of Oceanography**, La Jolla, Ca.
- González, C.A. y Sánchez, J.A. (1985). Estadística de oleaje frente al rompeolas del puerto de Ensenada, B.C. Estación de Investigación Oceanográfica de Ensenada, **D.G.O., Secretaría de Marina**, informe técnico, 32 pp.
- Houmb, O.G. (1984). Wave climate and processes. **Ocean Sci. Eng.**, 9(1): 1-23.
- Isaacson, M. and MacKenzie, N. (1981). Long term distributions of ocean waves: a review. **J. Wtrwy., Port, Coast. Oc. Div., ASCE**, 107(2): 93-109.
- Martínez-Díaz de León, A. y Nava-Button, C. (1987a). Sistema de adquisición, clasificación y análisis de datos de oleaje. **Instituto de Investigaciones Oceanológicas, UABC**, reporte técnico 87-03.
- Martínez-Díaz de León, A. y Nava-Button, C. (1987b). Estadísticas de oleaje en las costas de Baja California. **Instituto de Investigaciones Oceanológicas, UABC**, reporte técnico 87-04.
- Martínez-Díaz de León, A., Nava-Button, C. y Ocampo-Torres, F. (1989). Estadística de oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C., de septiembre de 1986 a agosto de 1987. **Ciencias Marinas**, 15(3): 1-20.
- Muir, L.R. and El-Shaarawi, A.H. (1986). On the calculation of extreme wave heights: a review. **Oc. Engng.**, 13(1): 93-118.
- Ochi, M.K. (1982). Stochastic analysis and probabilistic prediction of random seas. **Advances in Hydrosciences**, 13: 217-375.
- Seymour, R.J. (1989). Wave observations in the storm of 17-18 January, 1988. **Shore and Beach**, 57(4): 10-13.
- Seymour, R.J., Sessions, M.H. and Castel, D. (1985). Automated remote recording and analysis of coastal data. **J. Wtrwy., Port, Coast. Oc. Eng., ASCE**, 111(2): 388-400.
- Wyland, R.M. and Thornton, E.B. (1991). Extremal wave statistics using three hindcasts. **J. Wtrwy., Port, Coast. Oc. Eng., ASCE**, 117(1): 60-74.