

UN METODO PRACTICO DE PREVER OLEAJE EXTREMAL PARA EL CALCULO DE ESTRUCTURAS MARITIMAS(*)

Por ENRIQUE COPEIRO DEL VILLAR

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

La determinación de la altura de ola de cálculo es básica para el proyecto de todo tipo de estructuras marítimas. Los métodos habituales se basan en fórmulas empíricas poco adaptables a los estudios económicos que dependen de la vida previsible de la obra. En el artículo se presenta un método para la determinación del régimen extremal de oleaje, a partir de la distribución frecuencial de alturas de ola significante en el año medio. Para ello se usa un parámetro que depende exclusivamente de la duración media de los temporales y la frecuencia de presentación del oleaje en el vector direccional escogido. Finalmente se aplica a la zona NE. del Atlántico y al litoral español en San Ciprián (Lugo), zona de ubicación de una gran planta industrial.

1. Descripción del tema.

Durante los últimos años, ha sido publicada una cantidad considerable de datos de oleaje referentes a todos los acéanos. La gran mayoría de ellos consisten en distribuciones frecuenciales de alturas de ola y períodos significantes estimados visualmente por observadores a bordo de barcos, bien en posiciones estables (barcos meteorológicos), o en ruta (marina de guerra o barcos mercantes voluntarios). Tres buenos ejemplos de compilaciones de datos visuales son las "Sea and Swell Charts" (U.S. Hydrographic Office), "Ocean Wave Statistics" (Hogben and Lumb, National Physics Lab., U.K.) y el excelente trabajo de H. Walden "Die Eigenschaften der Meereswellen in Nordatlantischen Ozean" (Deutscher Wetterdienst Seeweteramt Hamburg). Recientemente están siendo publicados, según un programa de la Organización Meteorológica Mundial, resúmenes anuales de datos de oleaje correspondientes a los barcos

meteorológicos y a determinadas áreas marítimas de particular interés (por ejemplo, "Marine Climatological Summaries" del Atlántico Norte, publicados por Gran Bretaña, y el Mediterráneo, a cargo de Holanda).

Es harto frecuente que el proyectista de una obra marítima no disponga de más fuentes de datos de oleaje que las mencionadas arriba. Como mucho, en algunos proyectos de gran envergadura se ha podido disponer de un año para medir las características del oleaje *in situ* con un registrador.

Sin embargo, ni los resúmenes de unos cuantos años de datos de barcos en ruta ni las hipotéticas medidas instrumentales durante un año, suministran directamente el régimen extremal de oleaje.

Este régimen es, por otra parte, imprescindible para un diseño adecuado de las obras. La dificultad de su obtención hace que el proyectista acuda, con demasiada frecuencia, a viejas fórmulas empíricas que suministran una "ola de cálculo". La estructura determinista de esas fórmulas las hace inadaptables a los métodos habituales de cálculo económico, que de-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 30 de septiembre de 1976.

penden de la vida previsible de la obra. El sentido físico de esta "ola de cálculo", que no está vinculada a período de retorno alguno, es muy problemático. Por otra parte, resulta desconocida la eficiencia intrínseca de aquellas fórmulas fuera de las áreas específicas en que fueron taradas a partir de observaciones.

En este trabajo se propone calcular el régimen extremal de oleaje, para cualquier sector direccional, a partir de la distribución frecuencial de alturas de ola significativa en el año medio. Para ello se usa un parámetro que depende exclusivamente de la duración media de los temporales y la frecuencia de presentación del oleaje en el sector direccional escogido.

La duración media de los temporales que sobrepasan una cierta altura de ola sólo puede estimarse directamente a partir del análisis de la curva de estados del mar, tal como es suministrada por observaciones hechas en un punto fijo y con un intervalo de tiempo reducido. Por lo tanto, la información de los barcos en ruta no es de utilidad a este respecto. Si lo es, en cambio, la suministrada por los barcos meteorológicos (tres a una hora de intervalo) o los registradores de oleaje colocados *in situ*.

Conocida la ley de variación de la duración media de temporales con la altura de ola en varios puntos de la costa, algunas de las leyes correspondientes a puntos intermedios pueden hallarse por interpolación. A este respecto, la información que suministre la red de registradores de oleaje existente en la costa española (descrita por P. Suárez Bores, 1973) podría ir rindiendo ya resultados útiles, aunque el número de años registrado no sea suficiente para confeccionar directamente regímenes extremales fiables. Esa red de registradores no discrimina direcciones y, por tanto, su información sería únicamente aplicable al régimen escalar. Para el uso correcto de las estimas de duración de temporales hechas a partir de un número reducido de años y, por tanto, no muy exactas, es necesario conocer la forma general de la relación duración-altura de ola, punto que se discutirá más adelante. De este modo, se puede ajustar la ley general a los datos usando, por ejemplo, unos ejes coordenados graduados en forma conveniente.

Las duraciones de temporales, direccionales o escalares, no siempre son directamente interpolables entre lugares distintos de la costa. Para juzgar la conveniencia de las interpolaciones es

necesario tener conocimiento de las características generales de la generación y desarrollo de los temporales en el mar. Las cartas de densidad de borrascas son un instrumento muy valioso a este respecto; en un apartado posterior se muestran dos de tales cartas correspondientes al Atlántico norte.

Estos criterios de cálculo se han aplicado a una zona del NE. del Atlántico, y utilizados en el diseño de un nuevo puerto que va a construir en San Ciprián (Lugo) Alúmina Española, Sociedad Anónima, y Aluminio Español, Sociedad Anónima.

Las leyes de variación de duración de temporales en varias direcciones han sido halladas en algunos barcos meteorológicos de esa zona del océano. Se ha comprobado así que las interpolaciones entre direcciones adyacentes, para un mismo lugar, y entre lugares distintos, para un mismo sector direccional o para el régimen escalar, son perfectamente válidas cuando se utiliza un criterio adecuado.

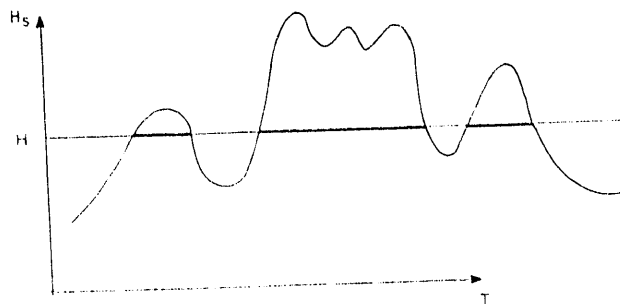
Las duraciones medias de los temporales no han sido halladas directamente, a partir de la curva de estados del mar. Para cada dirección se han calculado las duraciones a partir del régimen extremal y la distribución frecuencial absoluta de H_s (altura de ola significativo), "volviendo del revés" el modelo estadístico. La bondad de los resultados obtenidos constituye, pues, además, una comprobación satisfactoria del modelo mismo.

Un número de barcos meteorológicos mayor que el existente en la actualidad, proporcionaría una red de regímenes de duración de temporales a partir de la cual, por interpolación y extrapolación, podrían obtenerse los parámetros de cálculo necesarios en todos los puntos deseados de la plataforma costera. La red actual de barcos es pobre, aun en zonas privilegiadas como el Atlántico norte, pero aún así ha podido suministrar información utilizable para la costa noroccidental española.

La escasez de información disminuye, obviamente, la exactitud de los resultados obtenidos de la aplicación de estos criterios. Existen otras fuentes de incertidumbre, además, cuyo peso es, a veces, muy difícil de precisar. Por ejemplo, la precisión de las observaciones visuales individuales y el efecto de los cambios generales de clima.

Indudablemente, a medida que se van estableciendo métodos adecuados de cálculo, irán

también siendo puestos a punto sistemas de toma de datos que, en su día, alimentarán aquellos métodos. Sin embargo, mientras esos datos llegan habrá que seguir proyectando obras marítimas. El trabajo que se presenta aquí describe un caso en el que se muestra cómo se puede extraer utilidad práctica para el diseño, de los datos que hay disponibles "ahora".



2. El modelo estadístico.

El modelo se basa en el cálculo de la distribución del valor máximo que una variable X toma en un cierto intervalo de tiempo.

Sea X una variable aleatoria con una función de distribución:

$$P(X \leq Y) = F(Y)$$

Si el suceso X se presenta, aleatoriamente, n veces dentro de un intervalo de tiempo, la distribución del máximo valor que toma X en ese intervalo es:

$$\Phi(X) = [F(X)]^n \quad (2.1)$$

Esta es una regla probabilística elemental, según la cual la probabilidad de que un suceso aleatorio se presente todas las veces durante n "pruebas", es n veces la probabilidad de que aquel suceso ocurra en una "prueba" cualquiera.

Al aplicar esta teoría al oleaje aparecen varias dificultades.

La primera es determinar cuál es el "número de pruebas", n , que ocurre en la unidad de tiempo. Esta última debe tomarse igual a un ciclo meteorológico, o sea, un año. El problema está en el hecho de que la función de distribución de H_s no suministra información alguna sobre la duración del "estado del mar" caracterizado por H_s . Es necesario, pues, buscar una conexión entre H_s y duración, problema que quizá fue apreciado por primera vez por J. A. Battjes (1970).

La conexión buscada puede ser facilitada por el hecho de que H_s varía con el tiempo, a lo largo del año, describiendo una curva continua ondulada.

Se pueden definir "temporales" con $H_s \geq H$. Durante cada uno de estos "temporales" la curva de estados del mar permanece por encima de H , como se muestra esquemáticamente en

el dibujo anterior. La duración de esos temporales es variable y susceptible de medida. Se puede hablar de la duración media de los temporales que superan cierta altura de ola, $t(H_s)$. Es obvio que esa duración media aumenta al disminuir H_s .

La situación descrita arriba puede reducirse a un fenómeno con dos sucesos posibles: la presentación de un temporal ($H_s \geq H$), o su no aparición. El número total de veces que el temporal "podría" presentarse en un año, es la duración del año dividida por la duración media del temporal correspondiente. Ese es el "número de pruebas". La probabilidad de presentación de un temporal ($H_s \geq H$) en una "prueba" cualquiera, es precisamente el porcentaje del tiempo total en que se sobrepasa H , o sea, $[1 - F(H)]$.

La probabilidad de que el temporal ($H_s \geq H$) no se presente en el año es:

$$\Phi(H_s) = [F(H_s)]^n \quad (2.2)$$

donde:

$$n = \frac{8760}{t(H_s)}; \quad (t(H_s) \text{ en horas}) \quad (2.3)$$

$\Phi(H_s)$ es la probabilidad de que H_s sea el máximo estado del mar en el año, es decir, la distribución extremal de H_s .

El período de retorno de H_s es:

$$T(H_s) = \frac{1}{1 - [F(H_s)]^n} \quad (2.4)$$

Para valores de $T(H_s)$ iguales o superiores a unos diez años, la expresión anterior puede ser sustituida por el período de retorno de las excedencias de H_s :

$$T_e(H_s) = \frac{1}{n[1 - F(H_s)]} \quad (2.5)$$

El segundo problema es la aleatoriedad de las "pruebas". La teoría que permite formular la ecuación (2.5) requiere que todas las "pruebas" sean estadísticamente independientes, lo que significa que los temporales aparecen aleatoriamente. Esta es una hipótesis dudosa para valores medios y bajos de H_s , pero parece correcta para los valores elevados de H_s , que sólo ocurren muy raramente. Esos valores son precisamente, los que interesan a efectos de la descripción estadística de valores extremos. A este respecto, E. Gumbel (1957) comenta que, en distribuciones formadas con valores mutuamente dependientes, la influencia de esa independencia se anula para valores grandes de la variable. El mismo autor presenta una demostración, debida a G. S. Watson (1954), de aquella afirmación, demostración que es válida para la distribución asintótica del mayor valor de una variable ilimitada.

La hipótesis de aleatoriedad en la presentación de temporales excepcionales puede, por tanto, ser adoptada con confianza.

3. Caracterización de otros modelos mediante el parámetro "n".

El cálculo del régimen extremal de oleaje por medio del parámetro "n", tal como se define en la ecuación (2.3), es aplicable a otros modelos estadísticos sugeridos previamente.

K. G. Nolte (1973), en un estudio comparativo exhaustivo, analiza cinco modelos que predicen el período de retorno de alturas de ola individuales. Después de hacer correcciones en algunos de ellos, este autor encuentra que todos dan resultados muy similares. La aplicación de los modelos a alturas de ola significantes es inmediata. Sin embargo, el tipo de datos que deben ser introducidos en los modelos corregidos les restan considerablemente aplicabilidad práctica.

Los llamados por Nolte "modelos de temporal" se adaptan particularmente bien a ser caracterizados mediante el parámetro n . Estos modelos consideran las alturas de ola agrupadas en "temporales", como se ha hecho en la sección 2. Los modelos tienen básicamente la misma estructura. Un modelo de este tipo puede ser descrito como sigue:

Supongamos que el año medio contiene λ temporales que sobrepasan un cierto límite in-

ferior, H_1 . La función de distribución que se utiliza en el modelo, $S(H_s)$, es la probabilidad de presentación de una altura de ola significativa mayor que H_s en el temporal medio. El período de retorno es definido como el intervalo medio de tiempo entre temporales que superan H_s :

$$T_c(H_s) = \frac{1}{\lambda \cdot S(H_s)}$$

Se demuestra fácilmente que el período de retorno de H_s no cambia, cualquiera que sea el límite inferior H_1 escogido, siempre que $H_1 \leq H_s$. Por tanto, podemos escoger $H_1 = H_s$, con lo cual todos los temporales inferiores a H_s quedan excluidos de la estadística.

Según esto, $S(H_s) = 1$ y λ = número de temporales superiores a H_s en el año medio.

$$T(H_s) = \frac{1}{\lambda}$$

λ puede ser hallado a partir de la duración media de los temporales.

$$\lambda = \frac{8760 \cdot [1 - F(H_s)]}{t(H_s)} = n \cdot [1 - F(H_s)]$$

Por lo tanto:

$$T(H_s) = \frac{1}{n [1 - F(H_s)]}$$

Que coincide con la ecuación (2.5).

4. Estimación de n.

La duración media de temporales extraordinarios no puede ser caracterizada adecuadamente promediando los valores de esas duraciones según fueron registradas, debido precisamente a la rareza de su presentación. Sin embargo, si se pudiera establecer la ley de variación de $t(H_s)$ con H_s , a partir de los temporales más abundantes en los registros, se podría extrapolar esa ley a valores superiores de H_s .

La estima de la duración media de temporales puede abordarse de dos formas:

4.1. Estima directa.

Se ha indicado ya cómo puede estimarse H_s a partir de la curva de estados del mar.

Las observaciones visuales suministradas por barcos en ruta dentro de una cierta área, no pueden ser utilizadas con este propósito, ya que su situación e intervalo varían aleatoriamente y no se facilitan con los datos de oleaje publicados.

Si se realizan medidas instrumentales *in situ*, el tiempo disponible es necesariamente corto y las duraciones medias estimadas constituyen sólo (especialmente si se pretende discriminar direcciones) una aproximación grosera.

La utilidad de los valores obtenidos así, aumenta considerablemente si se conoce de antemano la forma de la relación de $t(H_s)$ con H_s . Para caracterizar esa relación, se ha utilizado información de los barcos meteorológicos aplicando el método de estima indirecta como se expone a continuación.

4.2. Estima indirecta.

Si se dispone de una muestra extremal de H_s suficientemente amplia, en un punto dado, la función de distribución extremal $\Phi(H_s)$ puede ser estimada a partir de aquella y la ecuación (2.2) permite calcular n con la expresión:

$$n = \frac{\log \Phi(H_s)}{\log F(H_s)} \quad (4.1)$$

La aplicación de esta ecuación a varios sectores direccionales, en los barcos meteorológicos del Atlántico NE, proporciona una relación aproximadamente exponencial entre n y H_s , para valores altos de H_s , como se mostrará en un apartado posterior.

5. Curvas de diseño.

El uso de la función de distribución extremal, $\Phi(H_s)$, para el diseño de obras marítimas, no consiste en calcular directamente con la altura de ola correspondiente a un período de retorno igual a la vida prevista de la obra. La función que debe usarse en el diseño es la que da la probabilidad de que una cierta altura de ola H_s no sea superada en la vida de la obra, N .

Esa función es:

$$\Phi_N(H_s) = [F(H_s)]^{nN} \quad (5.1)$$

La función $\Phi_N(H_s)$ puede introducirse en los cálculos económicos usados habitualmente para determinar la altura de ola óptima. Se puede demostrar fácilmente que el uso de $\Phi_N(H_s)$ es equivalente a la aplicación del criterio de riesgo, tal como ha sido definido, por ejemplo, por A. Court (1953), a la distribución extremal $\Phi(H_s)$.

Dada una vida previsible de la obra N , y un riesgo admitido R de que la altura de ola significativa de cálculo H_c sea sobrepasada durante aquella vida, el período de retorno correspondiente a H_c es:

$$T(H_c) = \frac{N}{-\ln(1-R)} \quad (5.2)$$

Para valores altos de N y bajos de R , como es habitual, la expresión anterior converge en:

$$T(H_c) = \frac{N}{R} \quad (5.3)$$

Por otra parte, utilizando la ecuación (2.5) para el período de retorno de la distribución extremal $\Phi(H_s)$ (válida, como se advirtió, para valores de N superiores a unos diez años):

$$T(H_c) = \frac{1}{n[1-F(H_c)]} \quad (5.4)$$

Igualando las dos expresiones anteriores, se obtiene:

$$F(H_c) = 1 - \frac{R}{nN} \quad (5.5)$$

Por otra parte, cuando se utiliza la función $\Phi_N(H_s)$, la probabilidad correspondiente a H_c , R , es:

$$R = 1 - [F(H_c)]^{nN} \quad (5.6)$$

Esta expresión puede sustituirse de modo análogo y con la misma condición que se usó al reemplazar (2.4) por (2.5):

$$R = nN[1-F(H_c)] \quad (5.7)$$

De donde:

$$F(H_c) = 1 - \frac{R}{nN}$$

que es la misma expresión (5.5).

6. Aplicación del método a la costa NW española.

6.1. Datos disponibles y criterio de cálculo.

Las únicas fuentes de datos de oleaje referentes a la costa NW española que han podido encontrarse, son resúmenes de observaciones visuales realizadas en barcos en ruta. De entre ellos, tiene especial interés la publicación de la Organización Meteorológica Mundial "Marine Climatological Summaries for the Eastern North Atlantic" (Met. Inst., U.K.). En ella se presentan datos referentes a determinadas áreas reducidas de especial interés. Una de estas áreas, denominada número 4, está situada próxima a la costa N gallega (fig. 29), y proporciona la serie de datos más completa y específica que puede obtenerse, hasta el momento, de la zona relativa al proyecto de San Ciprián.

Los datos de la O.M.M. sirven para confeccionar regímenes de altura de ola significativa en cualquier sector direccional escogido. Sin embargo, las duraciones medias de los temporales no pueden ser obtenidas de esta información por razones expuestas anteriormente. La obtención directa del régimen extremal, a partir de observaciones, no ha sido empleada por dos motivos: Primero, el número de años publicados es excesivamente corto. Segundo, las alturas de ola mayores no quedarían adecuadamente representadas, debido a la costumbre de los barcos de desviar su ruta para evitar el encuentro con el núcleo de los temporales. La importancia de este último punto ha sido subrayada por N. Hogben (1974).

La solución adoptada fue el calcular las duraciones de temporales correspondientes a algunos puntos del Atlántico NE, donde están situados permanentemente los barcos meteorológicos I, J, K (ordenados de N a S). El barco K está a la misma altura que el área 4 y unos 70° desplazado hacia el W. Los resultados obtenidos han servido para estimar el tipo de relación entre H_s y $t(H_s)$, y para ver la medida de la

variación de las duraciones entre los lugares correspondientes a los tres barcos. De ello se han extraído conclusiones en cuanto a las duraciones que deben aplicarse al área 4. Con estas duraciones y los regímenes de H_s , se han calculado las curvas de diseño $\Phi_N(H_s)$.

Las distribuciones $F(H_s)$ han sido obtenidas, para cuatro sectores direccionales, del resumen de diez años publicado por H. Walden (1964).

Los datos de H. Walden constituyen "la distribución del sistema de oleaje dominante en cada instante". Esto quiere decir que, cuando una determinada observación de un barco diferencia entre dos o más trenes de ola presentes simultáneamente en varias direcciones, sólo se tiene en cuenta el tren con mayor H_s . Este tratamiento de los datos permite dividir el tiempo total del año en cuatro partes, cada una correspondiendo a un sector direccional. Por tanto, estas distribuciones direccionales de H_s no representan la verdadera probabilidad de ocurrencia de los valores inferiores de H_s (especialmente en las direcciones con menor energía de oleaje). En cambio, el rango superior de valores de H_s está descrito adecuadamente, si bien sus probabilidades no van referidas al tiempo total del año. Esta disposición del conjunto de datos es favorable a la aplicación del método extremal propuesto, como se verá más adelante. Los datos de los "Marine Climatological Summaries" son del mismo tipo.

En las figuras 1, 2, 3, 4 y 5 se muestran los regímenes direccionales y escalar correspondientes al barco K, ajustados por una distribución de Weibull. Esta distribución es, según ha demostrado J. A. Battjes (1970) con sólidos datos instrumentales, la más indicada para caracterizar los regímenes de altura de ola significativa (en el Atlántico NE. al menos). Debe puntualizarse que los regímenes trabajados por Battjes eran escalares y se desconoce, por tanto, si algunos regímenes direccionales pueden presentar desviaciones peculiares. De hecho, si bien todos los regímenes escalares utilizados en este trabajo se ajustan con una precisión sorprendente a la distribución de Weibull, en algunos regímenes direccionales el punto o los puntos más altos parecen desviarse de la tendencia general. Es cuestionable si esto es una peculiaridad real del oleaje para ese área y dirección o si es una desviación accidental debido a la baja caracterización estadística de esos

puntos, que han sido calculados con un número pequeño de datos.

En las figuras se señala con "Cambio de Código" a los puntos correspondientes a $H_s = 4,75$ m y $H_s = 9,75$ m. Esos puntos deben desecharse de la estadística (N. Hogben, 1967), pues se ha demostrado que, al utilizarse un código diferente cuando H_s supera esos valores, el observador sufre una influencia subjetiva que se traduce en una distorsión apreciable de la frecuencia atribuida a esos valores.

Los regímenes extremos de H_s han sido obtenidos a partir de los datos publicados en *Taglicher Wetterbericht* (Met. Inst., Alemania Occidental). Estas publicaciones suministran la información de oleaje de los barcos meteorológicos con intervalos de tres horas. Para la confección de los regímenes, se han examinado los partes correspondientes a diecinueve años. Ocasionalmente aparecen errores de codificación en los partes, por lo cual se realizó un contraste de aquella información con la publicada en *The Daily Weather Report* (Met. Inst., Gran Bretaña), que tiene seis horas de intervalo. Las cartas meteorológicas que figuran en los partes fueron también consultadas en los casos dudosos.

En las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 se muestran los diecinueve máximos valores de H_s registrados en el barco K, para las cuatro direcciones y su conjunto. La probabilidad de representación escogida es la recomendada por E. Gumbel (1975).

6.2. Estima de las duraciones de temporales en los barcos meteorológicos.

Utilizando la ecuación (4.1), se han calculado las duraciones de temporales para los cuatro sectores, W., N., E., S., y su conjunto, en el barco K. Para comparar las duraciones de temporales en las distintas direcciones, n debe ser dividido por la frecuencia de presentación, f , de la altura de ola dominante en cada dirección, ya que:

$$t(H_s) = \frac{8760 \cdot f}{n}$$

En la figura 11 se han representado las curvas H_s -duración (esta última representada por:

$$\frac{n}{f} = \frac{8760}{t(H_s)}).$$

La duración de los temporales aumenta, en el barco K, según el orden S., E., N., W. El régimen escalar ocupa una posición intermedia. Para caracterizar las distribuciones extremas se han utilizado las curvas que mejor ajustan el conjunto de datos, trazadas a sentimiento. El grado de precisión de las observaciones visuales no aconseja procedimientos más refinados.

Para efectuar una comprobación de la conveniencia de utilizar interpolaciones cuando se quiere caracterizar direcciones intermedias, se ha utilizado un sector de 45° centrado en el NE. El interés de ese sector direccional estriba en su papel fundamental dentro del proyecto de San Ciprián. Debido a la peculiar configuración de los fondos en torno a la ensenada de San Ciprián, el oleaje de esta dirección experimenta una concentración que incrementa notablemente su altura en la zona de los futuros diques de abrigo.

En las figuras 12 y 13 se muestran las distribuciones absoluta y extremal de H_s para el NE. (45°) en el barco K. La curva de duraciones correspondiente se ha señalado a trazos en la figura 11. El resultado es muy satisfactorio, teniendo en cuenta el orden de exactitud de los datos.

Un segundo grupo de cálculos se refiere a la variación de los regímenes de duración con el cambio de lugar en el océano. Las figuras 14 y 19 muestran las distribuciones de H_s para las direcciones W. y E., y para el régimen escalar, en los barcos I y J. En las figuras 20 a 25 aparecen los correspondientes datos extremos. En las figuras 26, 27 y 28 se comparan las duraciones del régimen escalar y de las direcciones W. y E. en los barcos I, J, K.

Según puede apreciarse, para el régimen escalar y la dirección W. las duraciones aumentan en el sentido I, J, K, lo que no ocurre en el oleaje del E.

La elección de este conjunto de direcciones obedece a su importancia en San Ciprián. Los resultados obtenidos dan ocasión a apreciar cómo el orden de variación de las duraciones, tanto en las distintas direcciones del barco K como en una misma dirección para los tres barcos, I, J, K, es coherente con el régimen característico del desarrollo de los temporales en el Atlántico Norte.

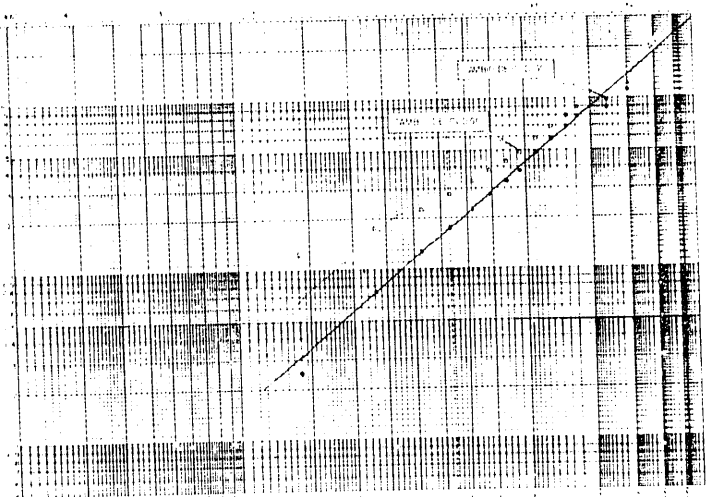


FIGURA N°1 REGIMEN DE OLAJE DEL OESTE EN EL BARCO METEOROLOGICO K SECTOR DE 90°

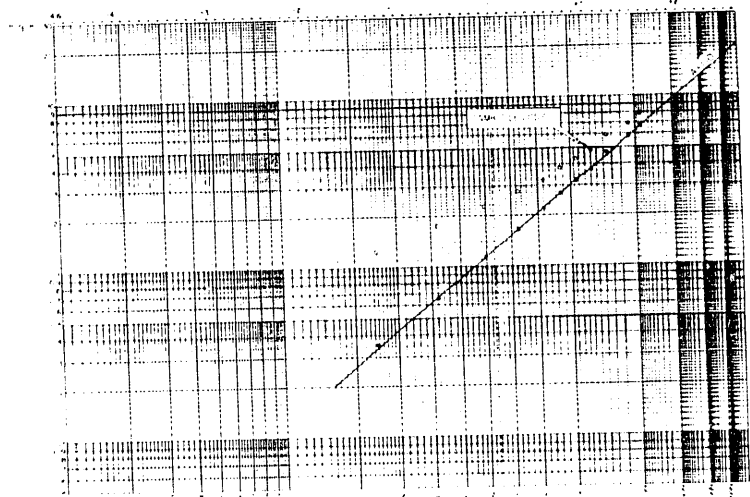


FIGURA N°4 REGIMEN DE OLAJE DEL SUR EN EL BARCO METEOROLOGICO K SECTOR DE 90°

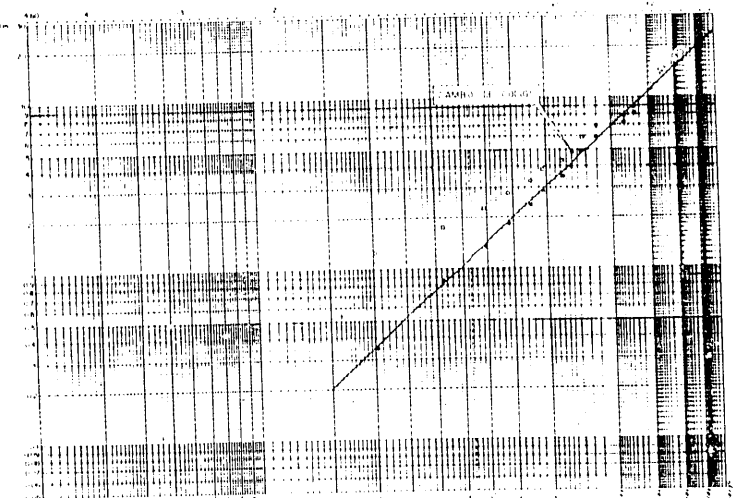


FIGURA N°2 REGIMEN DE OLAJE DEL NORTE EN EL BARCO METEOROLOGICO K SECTOR DE 90°

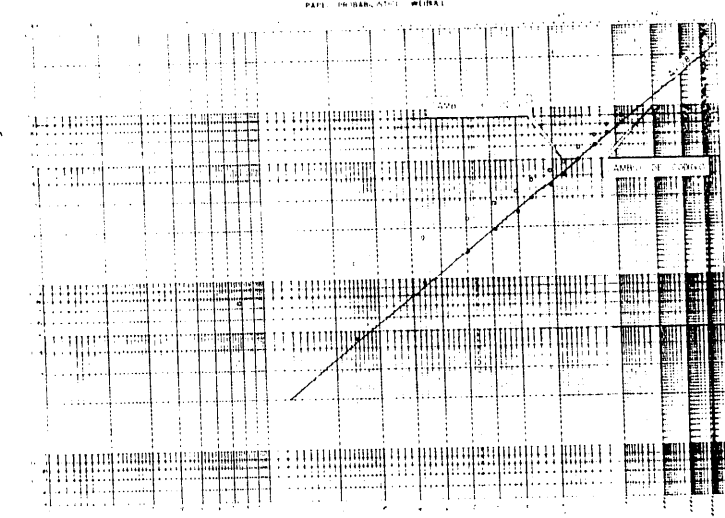


FIGURA N°5 REGIMEN DE OLAJE DEL ESTE EN EL BARCO METEOROLOGICO K SECTOR DE 90°

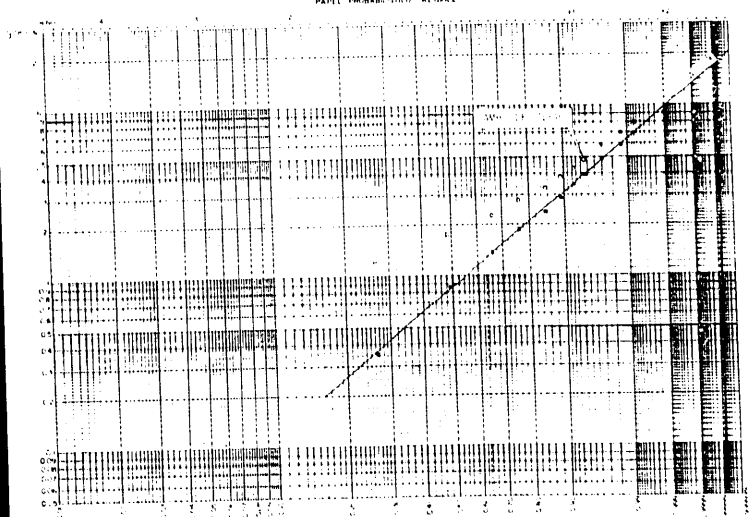


FIGURA N°3 REGIMEN DE OLAJE DEL OESTE EN EL BARCO METEOROLOGICO K SECTOR DE 90°

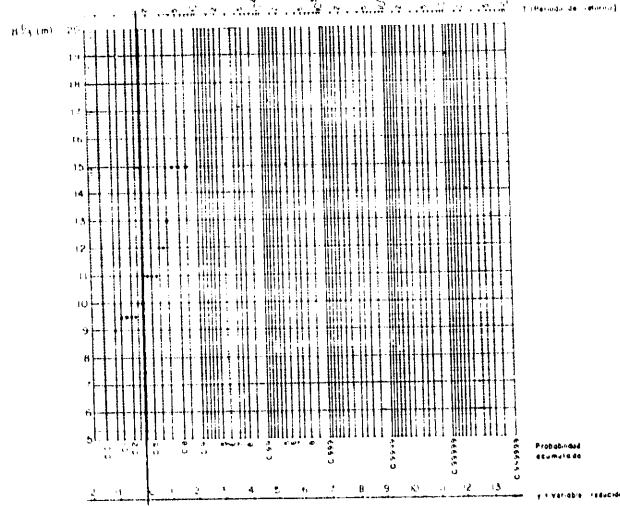


FIGURA N°6 MAXIMOS ANUALES DEL OESTE EN EL BARCO K.

PAPEL PROBABILISTICO Asintoto-1

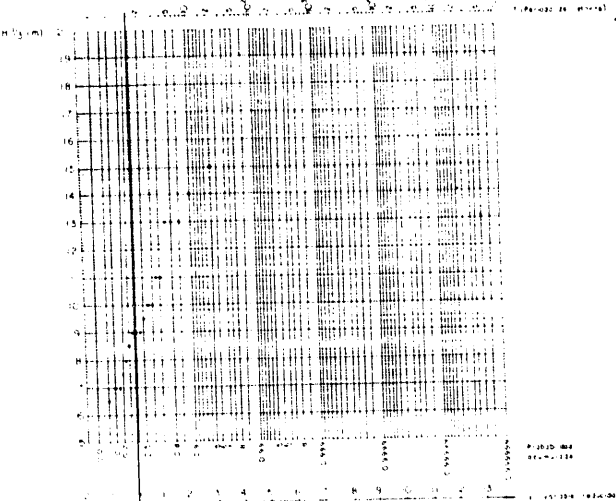


FIGURA N° 7 MAXIMOS ANUALES DEL NORTE EN EL BARCO K

PAPEL PROBABILISTICO Asintoto-1

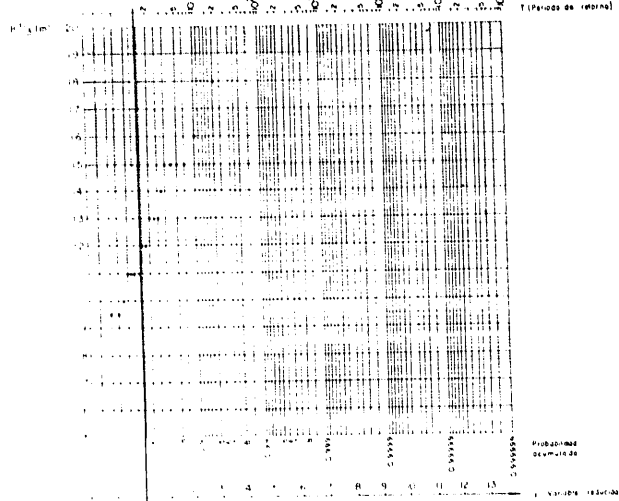


FIGURA N° 8 MAXIMOS ANUALES ESCALARES EN EL BARCO K

PAPEL PROBABILISTICO Asintoto-1

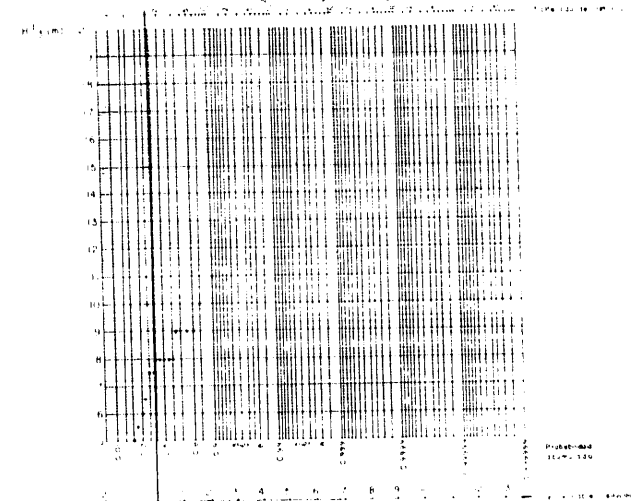


FIGURA N° 9 MAXIMOS ANUALES DEL ESTE EN EL BARCO K

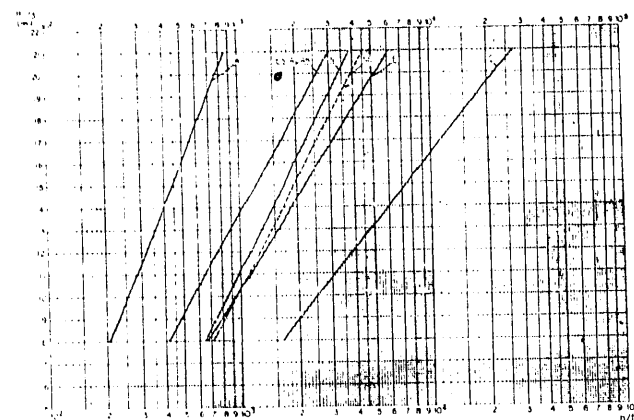


FIGURA N° 10 ESTIMA DEL VALOR DEL NORTE EN EL BARCO K, N.W.S.E. 304, NE 45°

PAPEL PROBABILISTICO Asintoto-1

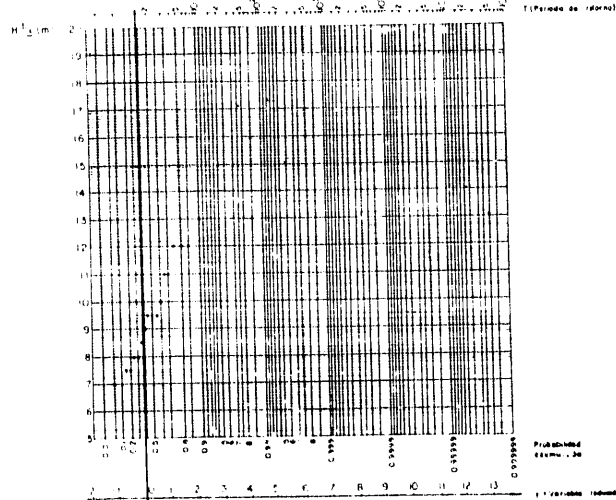


FIGURA N° 11 MAXIMOS ANUALES DEL SUR EN EL BARCO K

PAPEL PROBABILISTICO WEIBULL

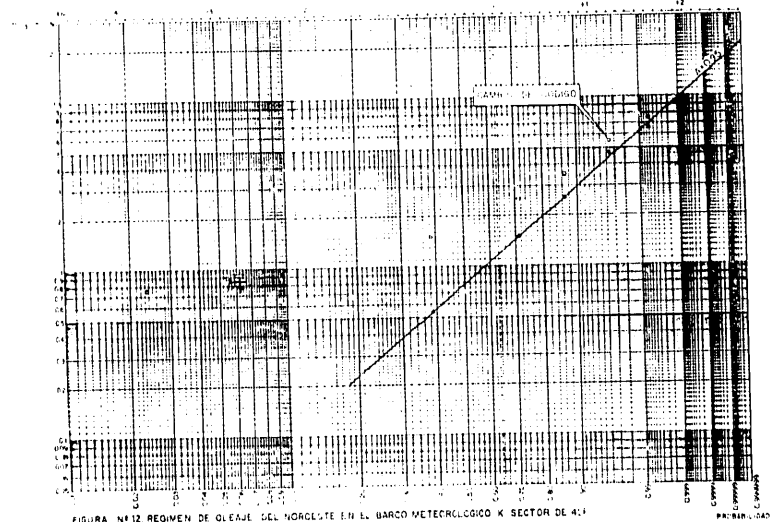
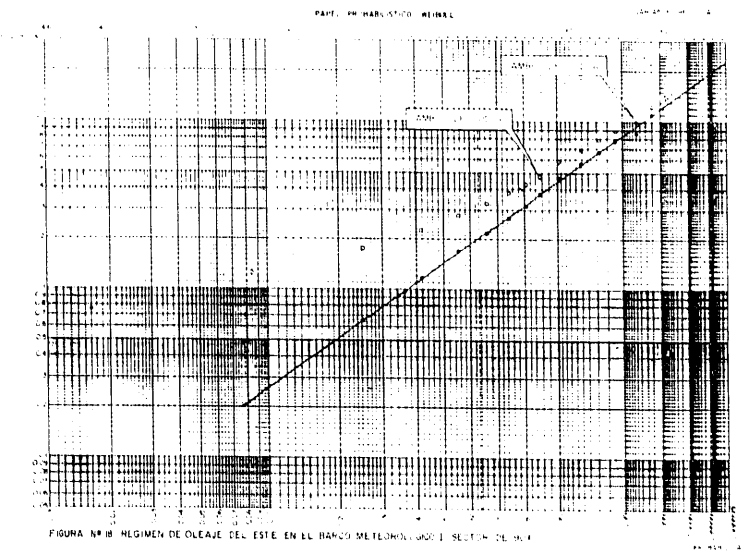
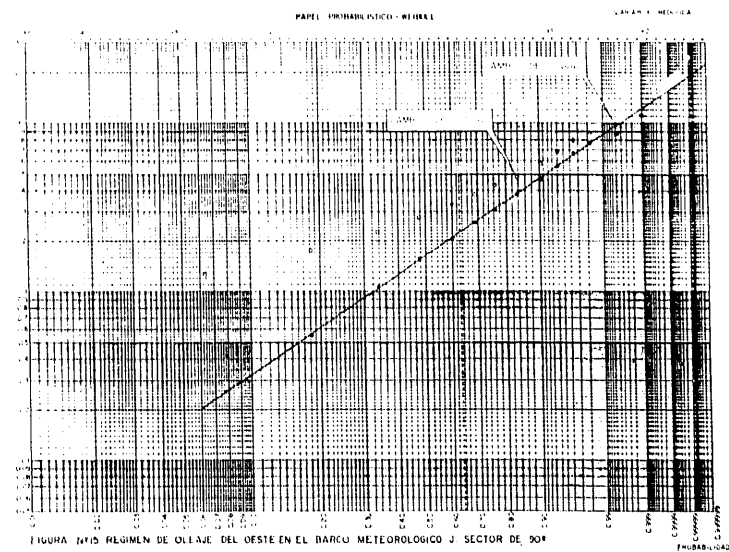
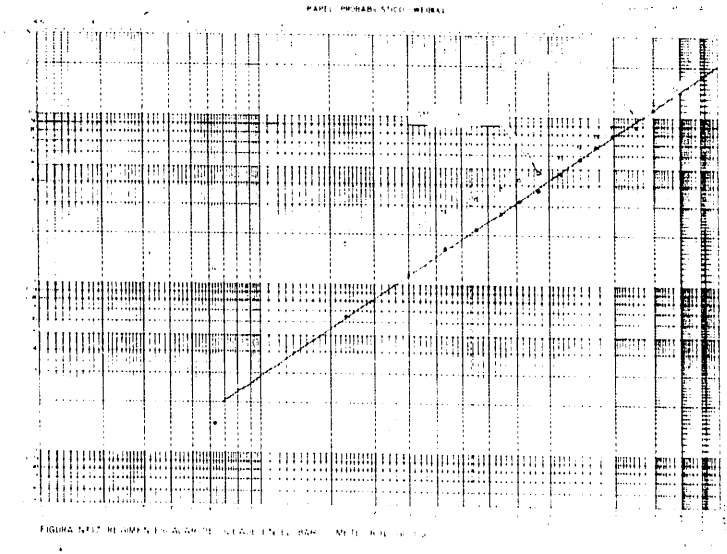
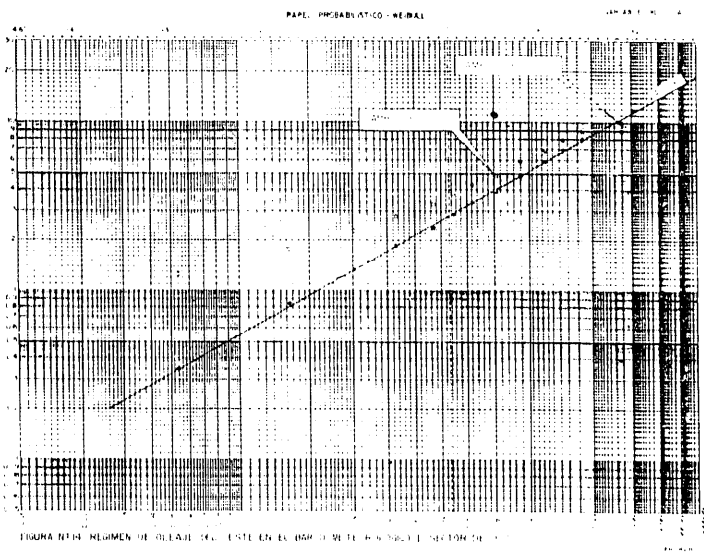
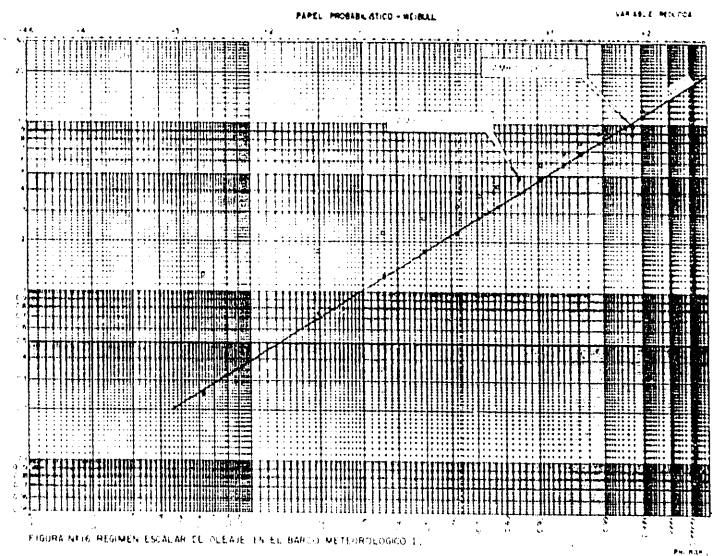
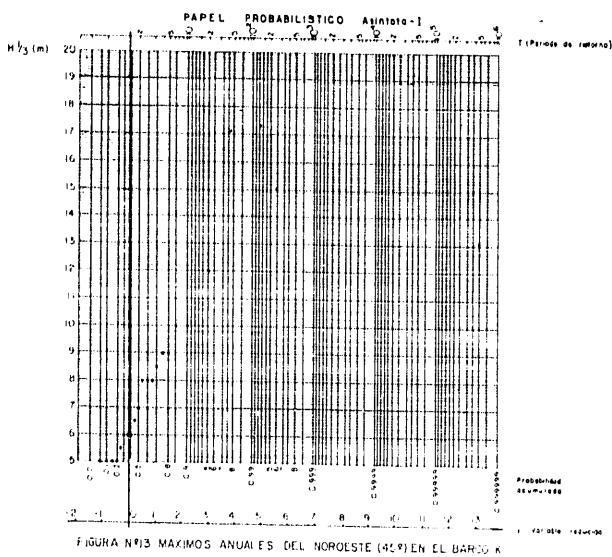


FIGURA N° 12 REGIMEN DE GLEAJE DEL NOROESTE EN EL BARCO METEOROLOGICO K SECTOR DE 41°



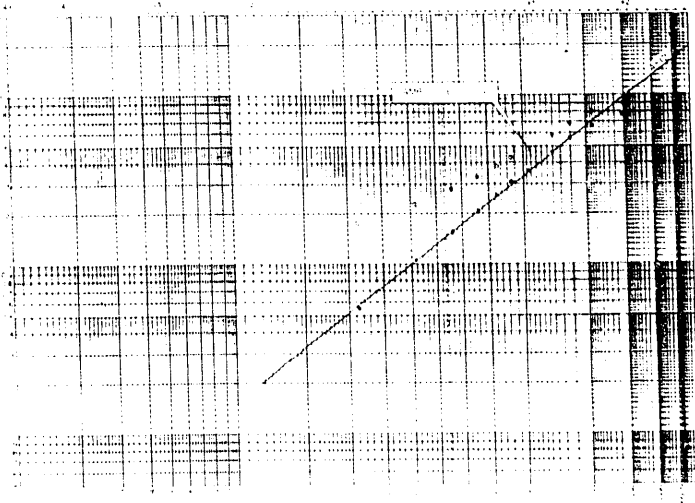


FIGURA N°18 MAXIMOS ANUALES DEL ESTE EN EL BARCO I

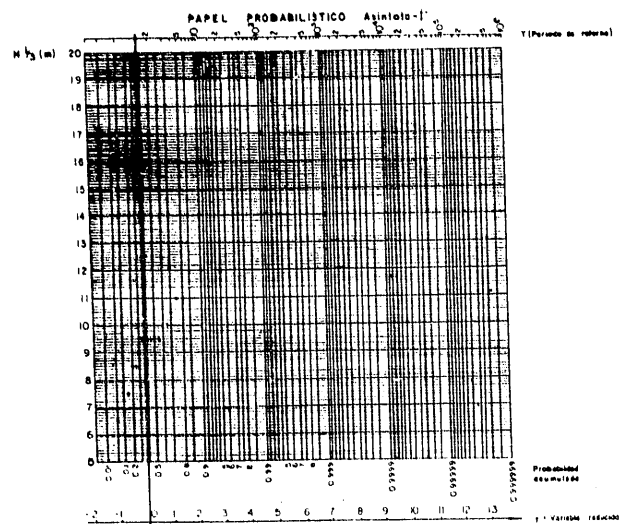


FIGURA N°22 MAXIMOS ANUALES DEL ESTE EN EL BARCO I

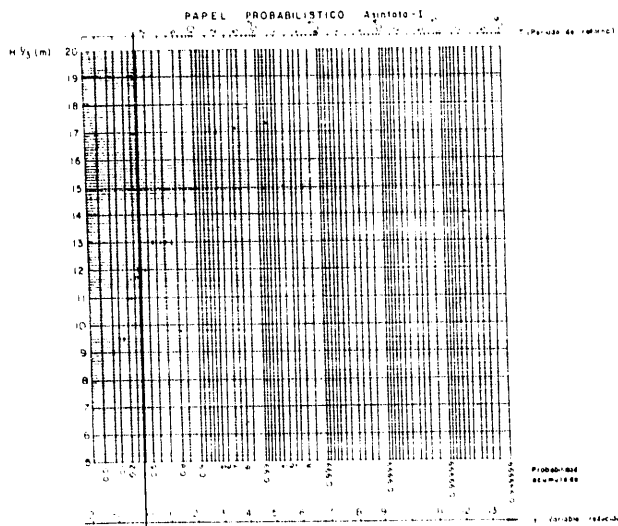


FIGURA N°20 MAXIMOS ANUALES DEL ESTE EN EL BARCO I

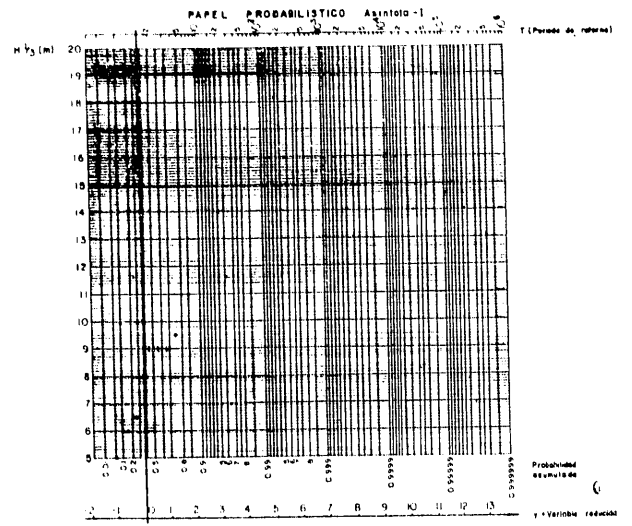


FIGURA N°23 MAXIMOS ANUALES DEL ESTE EN EL BARCO J

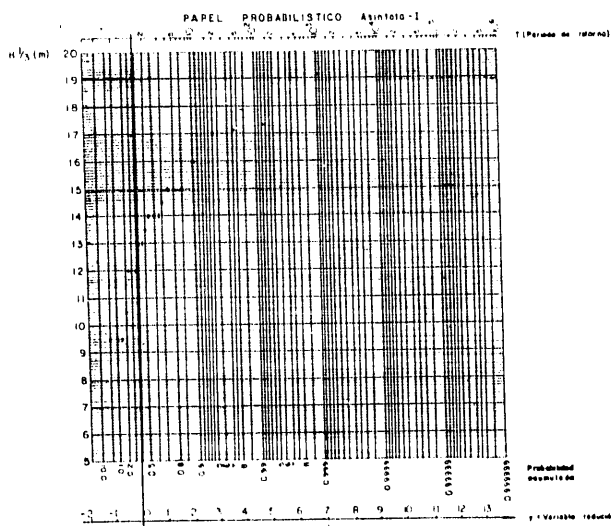


FIGURA N°21 MAXIMOS ANUALES DEL OESTE EN EL BARCO J.

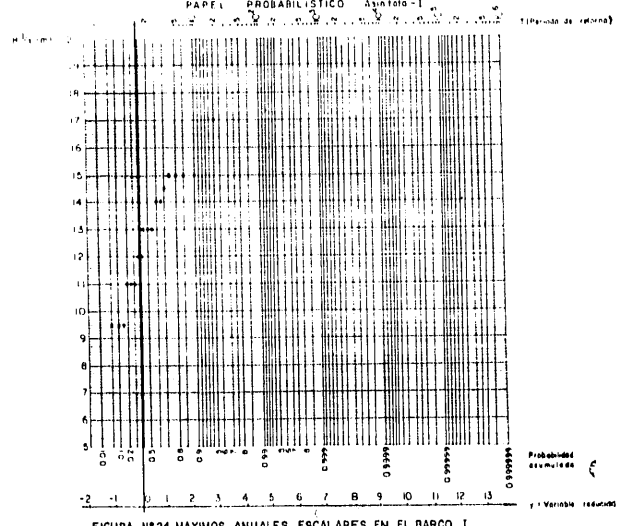
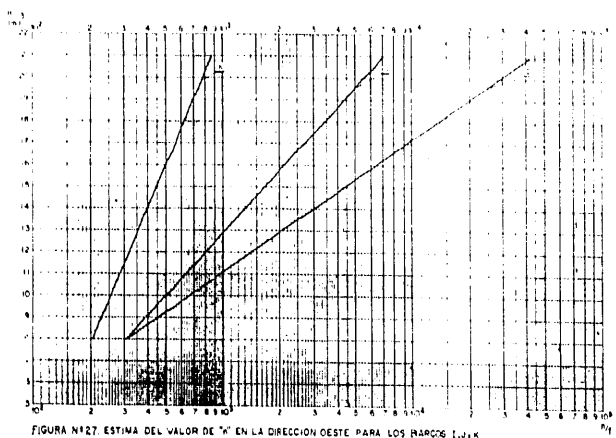
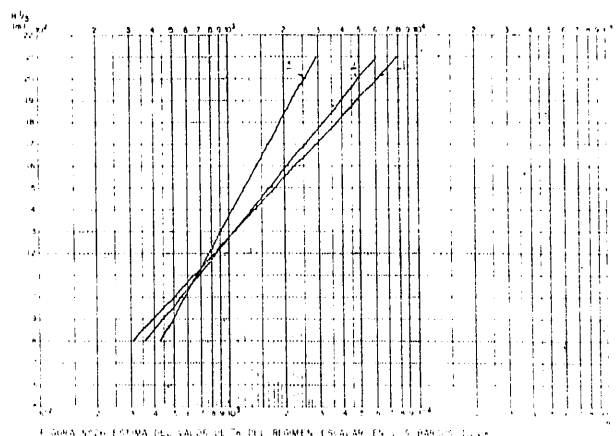
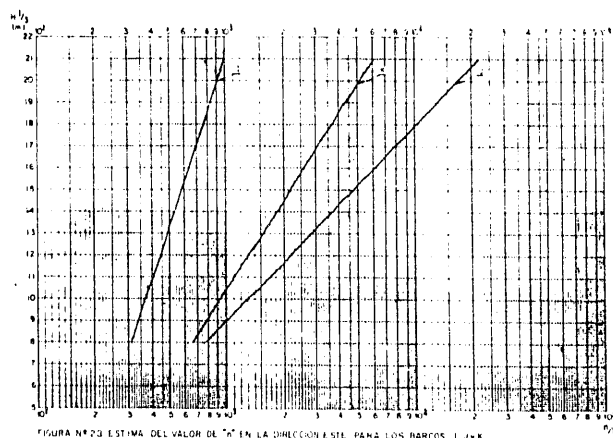
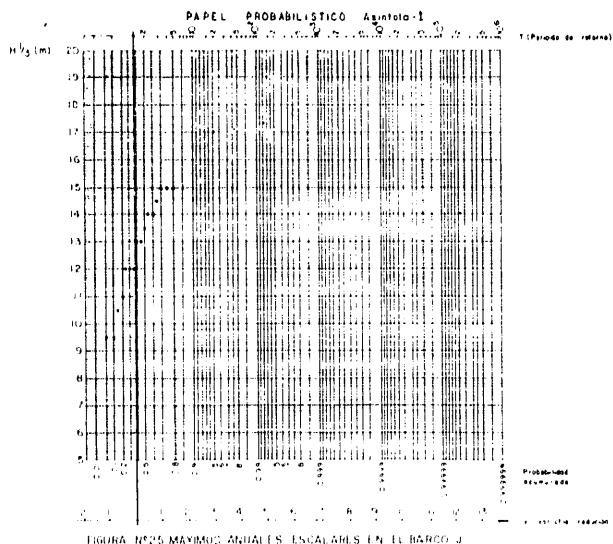


FIGURA N°24 MAXIMOS ANUALES ESCALARES EN EL BARCO I.



Las cartas de densidad de borrascas son un instrumento de gran utilidad a ese respecto. En las figuras 29 y 30 se han dibujado dos cartas, correspondientes al Atlántico Norte. En ellas se ha representado el número de centros de borrascas que han aparecido, durante cuarenta años, en los cuadrados de una red de 5°. Los datos han sido tomados de L. W. Pollak (1951). La segunda carta muestra las depresiones más intensas, por debajo de 990 mb. A partir de esos datos se han trazado isolíneas de centros de borrascas, mostrando áreas de concentración de esos centros y, por tanto, indicando la magnitud relativa de frecuencia e intensidad de vientos en todas direcciones. El uso de cartas de densidad de borrascas fue sugerido por R. Silvester (1956), con el fin de determinar la dirección predominante de transporte de arena en las costas.

Los centros principales de concentración de borrascas están, como puede verse, junto a Islandia, Groenlandia y la costa W. canadiense. Las isolíneas decrecen, en general, hacia el S y algo también hacia el E.

Las duraciones de los temporales están ligadas directamente a la longitud de *fetch* ocupado por el viento, y la persistencia de este último. Cuando las borrascas se mueven siguiendo ciertas trayectorias sobre los océanos, la duración de los temporales es superior hacia el final de esos caminos. La disposición de las isolíneas sugiere ya las características generales de estas trayectorias. En el Atlántico Norte los centros de baja presión se dirigen de W. a E., a veces con componente Sur: desde las áreas de concentración, donde se forman generalmente, hacia el continente europeo. La figura 30 es especialmente clara al respecto.

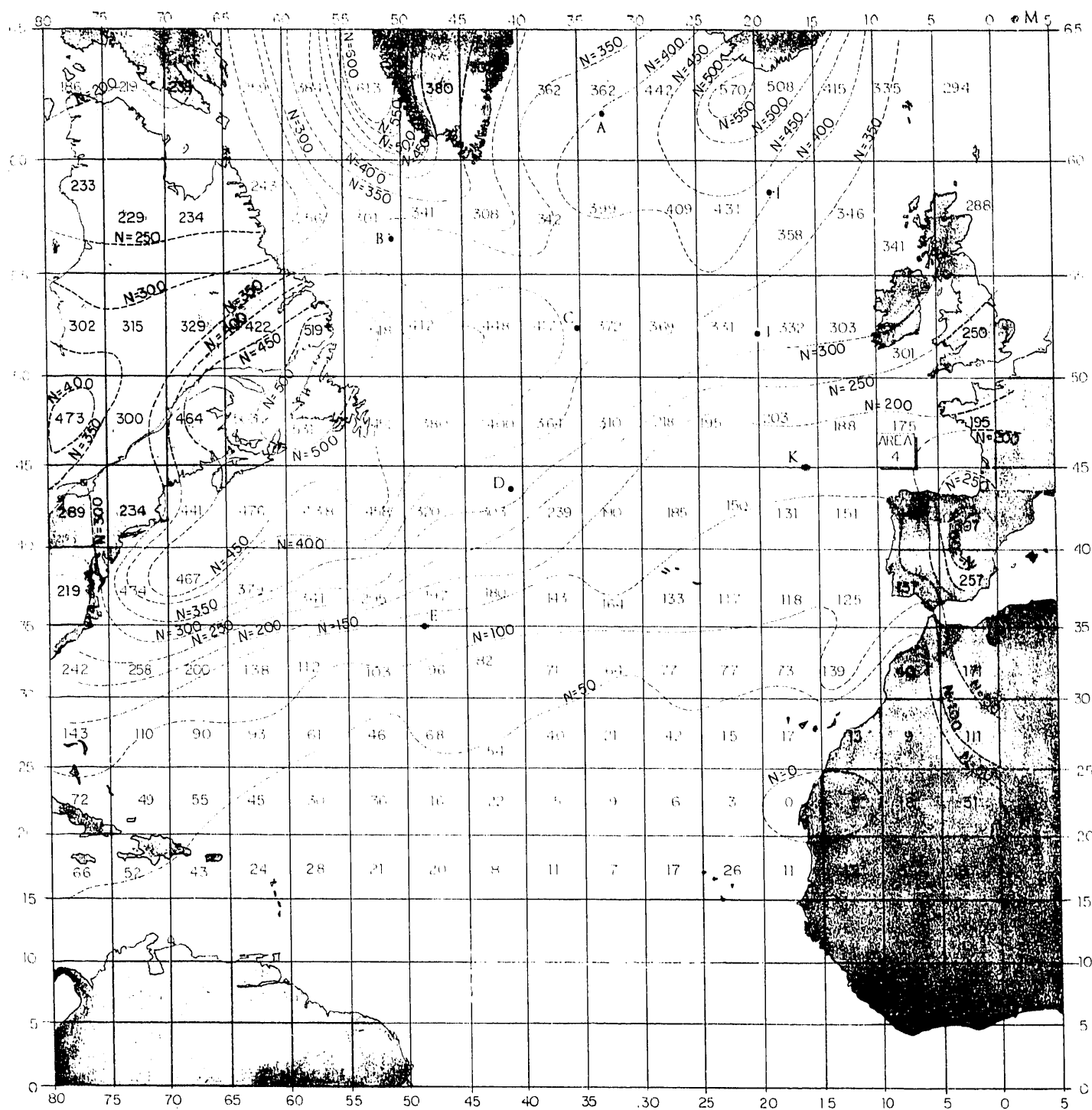


Fig. 29. — N , número total de centros de borrascas. Barcos meteorológicos: A, B, C, D, E, I, J, K, M. Número de centros de borrascas, 1899-1938. (Datos tomados de L. W. Pollak, 1951.)

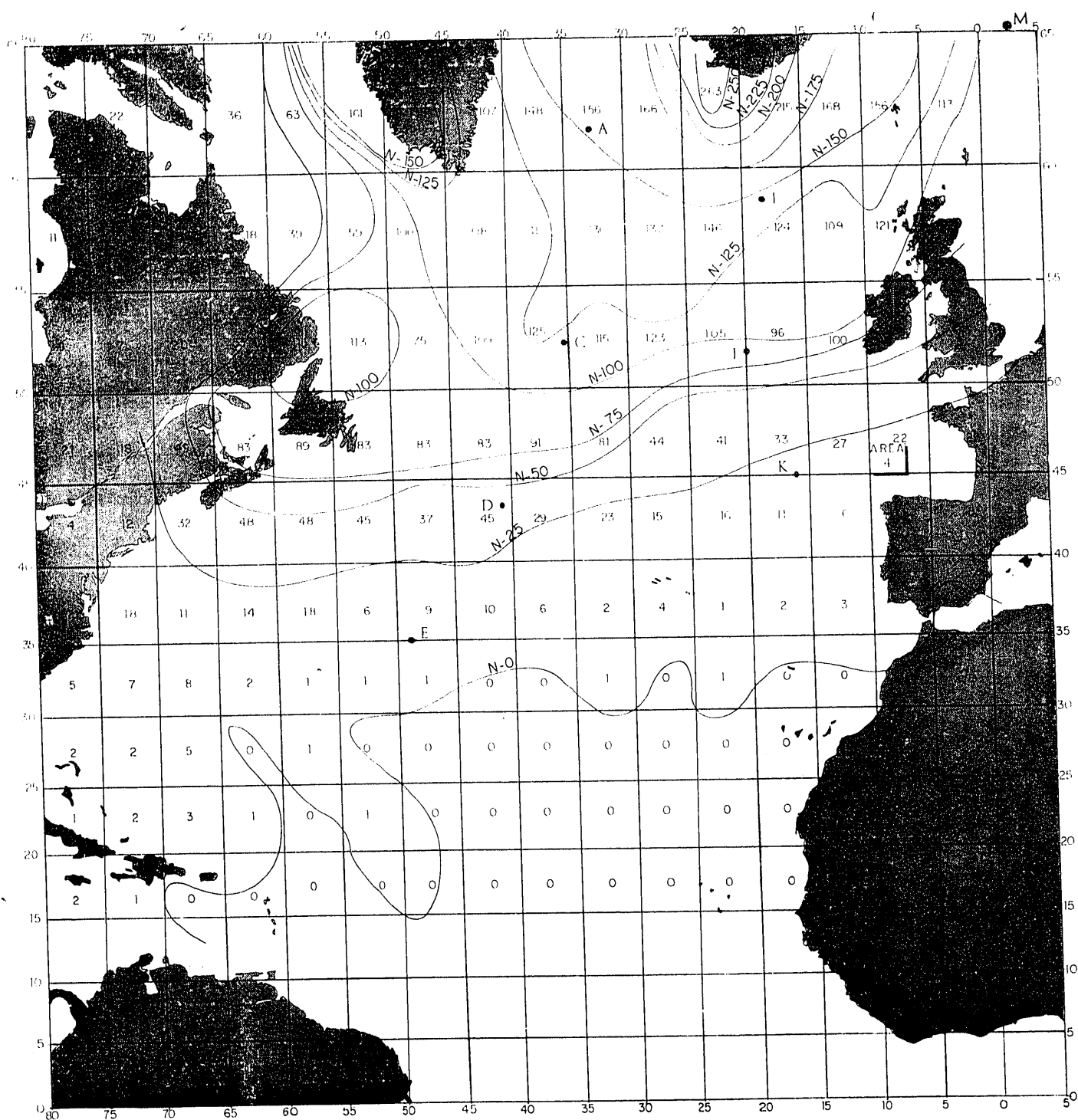


Fig. 30. — Número de centros de borrascas con presión en el centro inferior a 990 mb.

De estas consideraciones se desprende que la duración de los mayores temporales (régimen escalar) que afectan a los barcos I, J, K, estarán precisamente en esta secuencia creciente, obedeciendo al comportamiento general de los centros de baja presión. Esto se ve confirmado en los resultados de la figura 26. Los temporales del W. participan, obviamente, de las mismas características aún más acentuadas, como aparece en la figura 27 consecuentemente.

El comportamiento de los temporales del E. tiene explicación observando que, en la figura 29, aparece un área de concentración de borrascas sobre España. Esto hace incrementar la frecuencia de vientos de componente E. en el barco K (15,0 por 100) por encima de lo correspondiente al barco J (9,8 por 100) y casi tan alta como en I (16,6 por 100).

Se da mayor intensidad de vientos fuertes en J que en K y en I que en J, como se deduce de la figura 30 y se refleja en regímenes extremos más elevados en el orden K, J, I. Sin embargo, en la figura 28 las duraciones están en orden I, K, J. La mayor persistencia del viento del E. en K, junto con un *fetch* más largo confiere mayores duraciones a los temporales allí que en J, a igual altura de ola significativa. Esta secuencia no podía preverse claramente de antemano, con sólo la información de las figuras 29 y 30, pero ésta sí indica que podían esperarse anomalías respecto al orden de los regímenes escalares del W. Siguiendo estos razonamientos, la secuencia de duraciones para las distintas direcciones, en el barco K, queda explicada inmediatamente a la vista de las cartas.

6.3. La ley de variación de $t(H_s)$.

Se ha visto en las figuras anteriores que los valores de $\frac{n}{f}$, representados en un papel semilogarítmico contra la altura de ola, describen líneas rectas. Esto supone una relación exponencial entre ambas variables.

En realidad, las rectas han sido trazadas sustituyendo, con una gran aproximación, líneas que presentan una ligera curvatura. La razón de que la relación entre n y H_s sea muy aproximadamente exponencial para valores altos de H_s (el factor constante f no altera la forma de la relación), está en dos peculiaridades de las distribuciones $F(H_s)$ y $\Phi(H_s)$. Una de ellas es que

los regímenes extremos $\Phi(H_s)$ a través de la nube de puntos. En papel doble exponencial, se aproxima notablemente a la línea recta en todos los casos; en muchos de ellos, como puede apreciarse claramente, la línea recta da un ajuste totalmente satisfactorio.

La distribución doble exponencial (o asíntota I) es:

$$\Phi(H_s) = e^{-e^{-\frac{H_s - a}{b}}} \quad [6.3.1] \quad a, b, \text{ parámetros de la distribución.}$$

Por otro lado, se han caracterizado las distribuciones de H_s mediante la ley de Weibull, que tiene la forma:

$$F(H_s) = 1 - e^{-\frac{(H_s - A)^C}{B}} \quad [6.3.2] \quad A, B, C, \text{ parámetros de la distribución.}$$

Ambas expresiones son relacionadas mediante la fórmula (2.1):

$$\Phi(H_s) = [F(H_s)]^n$$

Para valores elevados de H_s , $F(H_s)$ es cercano a la unidad y la expresión anterior converge en:

$$\Phi(H_s) = e^{-n[1 - F(H_s)]} \quad (6.3.3)$$

Sustituyendo las distribuciones $F(H_s)$ y $\Phi(H_s)$:

$$\ln(n) = \frac{(H_s - A)^C}{B} - \frac{H_s - a}{b} \quad (6.3.4)$$

Ahora bien, en todas las distribuciones de Weibull ajustadas, el parámetro C resulta ser muy cercano a la unidad. Aparece la siguiente relación aproximada:

$$\ln(n) \simeq \frac{b - B}{bB} H_s + \frac{aB - Ab}{bB} \quad (6.3.5)$$

El utilizar esta aproximación está perfectamente justificada dentro del orden de precisión en que los datos disponibles nos permiten movernos. Por un lado, el ajuste de las distribuciones de Weibull se hace "a sentimiento", por lo cual el valor exacto de sus parámetros es discutible, siendo solamente constante la approxi-

mación de C a la unidad en todos los casos. Por otro, la precisión que puede esperarse de las observaciones extremales visuales no justifica el usar un método matemático de ajuste de la nube de puntos para caracterizar $\Phi(H_s)$.

En el apartado siguiente se discute la influencia en los resultados de utilizar una expresión aproximada para n .

De la relación aproximadamente exponencial hallada se deriva una interpretación interesante: la rápida disminución de la duración de los temporales al aumentar H_s implica la existencia de un cierto límite físico al crecimiento de la altura de ola significativa.

6.4. Sensibilidad de las predicciones extremales a los cambios del parámetro n .

El período de retorno de H_s viene dado por la expresión (2.5) siempre que valga más de unos diez años. Introduciendo en ella la distribución de Weibull (6.3.2) obtenemos:

$$n T(H_s) = e^{\frac{(H_s - A)^C}{B}}$$

Recordando que C es muy cercano a la unidad, se puede escribir:

$$H_s \simeq A + B \ln [n \cdot T(H_s)]$$

Utilizando dos valores diferentes de n (n_1, n_2) se obtienen, para un mismo período de retorno T , dos valores de H_s (H_1, H_2):

$$H_1 \simeq A + B \ln (n_1 \cdot T)$$

$$H_2 \simeq A + B \ln (n_2 \cdot T)$$

Restando:

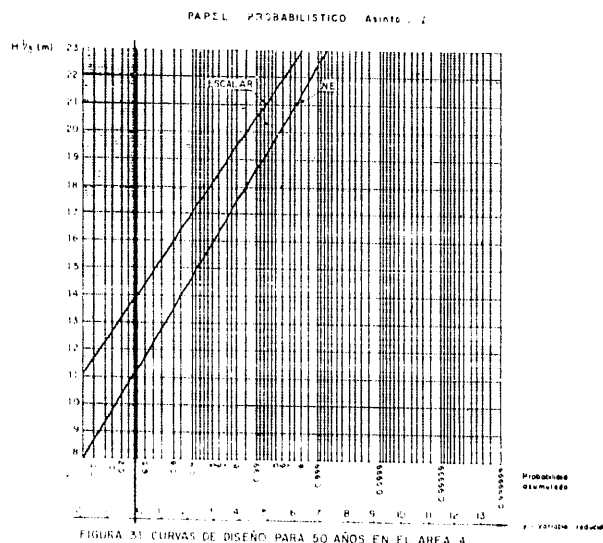
$$H_1 - H_2 \simeq B \ln \frac{n_1}{n_2}$$

El error en el valor de H_s que se predice cuando, en la ecuación (2.1), se usa 1,65 veces n en lugar de n es, para el mismo período de retorno, igual a $\frac{B}{2}$. Si se toma tres veces n , el error es casi igual a B . B es el valor de H_s con probabilidad 0,63. Los valores de B en los regímenes $F(H_s)$ obtenidos para el barco K son 1,55 m, 1,25 m, 1,70 m, 1,15 m y 1,24 m para los regímenes escalar, E., W., N. y S., respectivamente.

Se concluye que la sensibilidad de las predicciones a cambios pequeños en n es muy baja. Esta conclusión es de importancia decisiva en la aplicabilidad del método, tanto por autorizar el uso de expresiones aproximadas para n como para utilizar interpolaciones o extrapolaciones de n entre distintos puntos o direcciones.

6.5. Cálculo de las curvas de diseño.

Las curvas de diseño para agua profunda en San Ciprián han sido calculadas a partir de las distribuciones de H_s pertenecientes al área 4 (figura 29), mediante la ecuación (5.1). Las duraciones de temporales han sido estimadas a partir de las halladas para el barco K . En la figura 31 se muestran las curvas correspondientes al régimen escalar y al sector NE. (45°).



Las duraciones correspondientes al régimen escalar han sido tomadas ligeramente mayores que en el barco K , y para el NE., algo inferiores, en consecuencia, con la posición relativa de ambos lugares.

6.6. Limitaciones del método.

Es conveniente pasar revista brevemente a las limitaciones propias de la aplicación de los sistemas de cálculo expuestos al conjunto de datos utilizados.

Las fuentes de incertidumbre están básica-

mente en la calidad y cantidad de los datos con que se trabaja.

El número de observaciones con que se confeccionan las distribuciones extremales es un primer factor a tener en cuenta, cuando se obtienen las duraciones de temporales por el método indirecto utilizado aquí. Cuando el número de observaciones cambia, existe una variación sistemática de la pendiente de la recta ajustada. Números progresivamente mayores producen pendientes en disminución, lo que implica predicciones más conservadoras a mayor escasez de datos. Esto no deja de ser tranquilizador, pero da valor al esfuerzo empleado en la obtención de una mayor cantidad de datos. W. Potter (1949) verificó este hecho utilizando una enorme cantidad de registros de lluvias en U.S.A. A partir de un cierto número, la variación de la pendiente se hace despreciable.

El número de años utilizado en este trabajo, diecinueve, es bueno dentro de los estándares usuales (ver, por ejemplo, H. Thom (1970), o P. Suárez Bores (1973)). Sin embargo, debe ser mejorado a medida que haya mayor número de datos disponibles.

El segundo punto a observar se refiere al uso de la distribución de Weibull. Al contrario de lo que afirmaba recientemente B. Pedersen (1971), las extrapolaciones producidas por la ley de Weibull son altamente sensibles a la variación del parámetro A, ajustado a sentimiento. Por esta razón, es sumamente importante el establecer un criterio que homogeneice la calidad de los ajustes. El criterio adoptado en este trabajo ha sido ajustar el rango de H_s medias y bajas (con un límite inferior de 1 m, aproximadamente), y dar menos peso a las más escasas observaciones de los valores altos de H_s .

La bondad de este procedimiento, como se comentó en la sección 6.1, está bien comprobada para regímenes escalares (en el E. del Atlántico Norte al menos). Sin embargo, no se ha hecho hasta el momento una comprobación sistemática semejante, con datos instrumentales, para las distribuciones direccionales. La calidad de los resultados dependerá de la adecuación de aquella hipótesis a esos regímenes direccionales. Podemos argumentar que, de momento, no disponemos de una hipótesis mejor.

La calidad de las observaciones visuales de altura de ola significativa constituye otro tema de discusión. El tema ha sido abordado en varias publicaciones. N. Hogben (1969), que ha

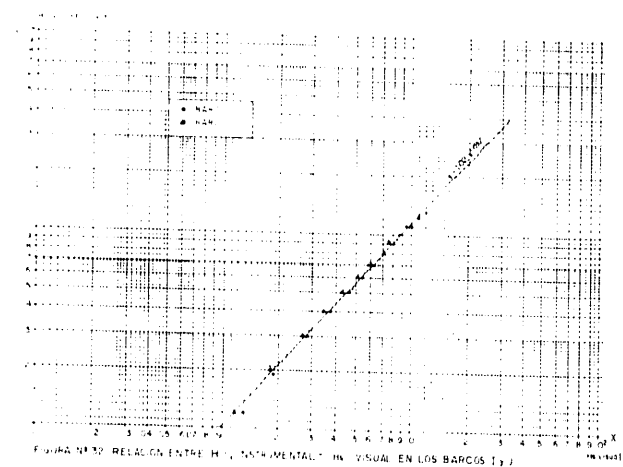
trabajado intensamente en la verificación de la fiabilidad de las estimas visuales de H_s , llega a conclusiones francamente optimistas al respecto, cuando los observadores han sido convenientemente entrenados. Partiendo de la hipótesis de una homogeneidad de resultados cuando se promedian un gran número de observaciones visuales, N. Nordestrom (1969) ha buscado una correlación sistemática entre la H_s estimada visualmente y la $H_{1/3}$ real. El resultado obtenido por este autor es la relación:

$$H_{1/3} = 1,68 H_s^{0,75}$$

Esta relación no ha sido confirmada por la comprobación que hemos hecho en los barcos I y J. Los datos instrumentales publicados por L. Draper and M. Whitaker (1965) y por L. Draper and E. Squire (1967) han sido representados, junto con la serie de datos visuales compilada por H. Walden (1964), en la figura 32. La relación resultante resulta ser:

$$H_{1/3} = 1,02 H_s^{1,05}$$

Esta ecuación debe preferirse para su uso en el barco K, por razones de similitud (es también un barco meteorológico y usa sistemas idénticos) y proximidad geográfica.



En cuanto a la precisión de las observaciones visuales de valores extraordinarios de H_s , se puede aducir una comprobación satisfactoria de N. Hogben (1969). En este punto, como en los anteriores, los proyectistas no podemos adoptar otro punto de vista que el pragmático: mientras no haya otros datos, aquellos son "los mejores" y tendremos que diseñar con ellos.

Será sumamente interesante el comprobar, con medidas hechas sobre la curva real de estados del mar, la relación "aproximadamente exponencial" entre n y H_s para valores altos de esta última. Es un tema que piensa abordarse en un futuro próximo por su importancia en el proceso de cálculo.

El conocimiento de los factores que aportan incertidumbre a la aplicación de estos métodos, permite ir mejorando el uso de estos últimos a medida que haya mejores datos disponibles. Por el momento, algunas comparaciones hechas con los resultados obtenidos en San Ciprián son satisfactorias:

En la dirección NE., un estudio realizado para San Ciprián por L. Draper (Institute of Oceanographic Science, U.K.) a partir del régimen extremal de vientos (elaborado por el British Meteorological Office) proporciona los resultados siguientes, para un período de retorno de cincuenta años: Aplicando el método de previsión de Bretschneider (revisado en 1970), $H_s = 11,5$ m; aplicando el método del I.O.S., 13,5 m. El resultado obtenido en este trabajo ha sido (fig. 31, probabilidad 0,37), $H_s = 11,1$ m.

En el estudio efectuado por L. Draper, a los inconvenientes que plantea la calidad de los datos se une la problemática delimitación de *fetches* y asignación de duración a los vientos. Resulta, pues, confortante, ver cómo los resultados son comparables a pesar de todas las fuentes de inexactitud que han sido señaladas.

7. Conclusiones.

7.1. La distribución extremal de H_s puede ser calculada a partir de la distribución de $H_{1/10}$ para cualquier sector direccional, cuando se conoce la duración media de los temporales y la frecuencia de presentación del oleaje dominante en ese sector.

7.2. Se demuestra que esas mismas condiciones sirven para caracterizar otros modelos extremales de oleaje establecidos anteriormente.

7.3. Las duraciones medias de temporales, $t(H_s)$, pueden ser estimadas directamente, a partir de la curva de estados del mar, o indirectamente cuando se conoce la distribución extremal. Conocidos los valores de $t(H_s)$ en varios puntos del océano o en varios sectores direccionales de un mismo lugar, las duraciones

correspondientes a lugares o sectores direccionales intermedios (o adyacentes) pueden estimarse por interpolación (o extrapolación).

7.4. Para juzgar la conveniencia de interpolaciones o extrapolaciones, es necesario conocer las características generales del desarrollo de los temporales en el mar. Las cartas de densidad de borrascas son un instrumento útil a este respecto.

7.5. La relación entre H_s y $n = \frac{8760}{t(H_s)}$ es, aproximadamente, exponencial, para valores altos de H_s , en las direcciones y barcos meteorológicos del E. del Atlántico Norte, que han sido utilizados en este trabajo. Esta relación, extrapolada, constituye un límite físico al crecimiento de la altura de ola significativa (la duración disminuye rápidamente al crecer H_s).

7.6. La sensibilidad de las distribuciones extremales calculadas, a cambios pequeños en el parámetro n , es muy baja. Este hecho da valor práctico a las interpolaciones y extrapolaciones.

7.7. Se recomienda el uso de las curvas de diseño $\Phi_s(H_s)$ para efectuar los cálculos económicos que proporcionan la ola de cálculo óptima.

INTERVENCIONES EN EL TRABAJO

La oportunidad, nada corriente, de haber dedicado un tiempo y esfuerzo en desarrollar un método original de cálculo del oleaje extremal, aplicable en San Ciprián, se debe al punto de vista progresivo de Victoriano Fernández Dupuy y William Brennan, ingenieros responsables del proyecto por parte de Intecsa. La publicación de los resultados ha sido posible igualmente gracias a su entusiasmo profesional. Las discusiones de William sobre el contenido del artículo han sido también de gran valor práctico.

El profesor R. Dorrestein (KNMI, Países Bajos) ha revisado el trabajo original, sugiriendo comentarios interesantes. Asimismo, las conversaciones mantenidas, durante el período de búsqueda de datos, con N. Hogben (Nat. Phys. Lab., U.K.), L. Draper (Inst. Ocean. Sc. Wormley, U.K.) y M. Tann (Inst. Ocean. Sc., Taunton, U.K.), proporcionaron una información valiosa sobre varios aspectos del tema.

José Luis Ramírez llevó adelante, al frente de un equipo de trabajo de Intecsa, el improbable trabajo de extraer con fiabilidad los datos extremos contenidos en diecinueve años de publicaciones.

Las largas discusiones de trabajo con el profesor Pedro Suárez Bore y Miguel Losada, cuando bajo la dirección de Pedro realizábamos el primer régimen extremal de oleaje hecho en España a partir de cartas meteorológicas (para Bilbao), constituyeron el germen del tema desarrollado aquí.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- BATTJES, J. A.: "Long term wave height distribution at seven stations around the British Isles". (N.I.O. Internal Report No. A. 44.) 1970.
- COURT, A.: "Wind Extremes as Design Factors". (J.F.I., July 1953.)
- DRAPER, L. and WHITAKAR, M.: "Waves at Ocean Weather Ship Station Juliett". (Deutsche Hydrographische Zeitschrift.) 1965.
- DRAPER, L., and SQUIRE, E.: "Waves at Ocean Weather Station India". (Trans. The Royal Institution of Naval Architects.) 1967.
- GUMBEL, E.: "Statistics of Extremes". (Columbia Univ. Pres.) 1957.
- HOGBEN, N., and LUMB, F.: "Ocean Wave Statistics". (Ministry of Technology, Nat. Phys. Lab., U. K.) 1967.
- HOGBEN, N.: "Measured and visual wave data and wind observation from trawlers". (Ship Report 134, Nat. Phys. Lab., U. K.) 1969.

- HOGBEN, N.: "Ocean Wave Statistics. Five minutes slow after six years". (NLP Report 180, U.I.C.) 1974.
- NOLTE, K. G.: "Statistical Methods for Determining Extreme Sea States". (Second Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Iceland.) 1973.
- NORDESTROM, N.: "Methods for Predicting Long Term Distributions of ave Loads and Probability of Failure for Slips, Appendix II". (Det Norske Veritas, Rep. No. 69-22-5.) 1969.
- PEDERSEN, B.: "Predictions of Long-Term Wave conditions with Special Emphasis on the North Sea". (Proc. First Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Norway.) 1971.
- POLLAK, L. W.: "Frequency of the Centres of Closed Low Pressure Systems Over the North Atlantic Ocean". (Dublin Inst. for Advanced Studies Geophysical Bulletin, number 3.) 1951.
- POTTER, W.: "Simplifications of the Gumbel Methods for Computing Probability Curves". (U.S. Dept. Agr. Soil Cons. Serv.) 1949.
- SUAREZ BORES, P.: "Primer Curso de Análisis, Planeamiento y Gestión del Medio Litoral. Torremolinos". Editado por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1973.
- SILVESTER, R.: "The use of Cyclonicity Charts in the Study of Litoral Drift". (Trans. Am. Geoph. Un. 37.) 1956.
- THOM, M.: "Extreme Wave Height Distributions Over Oceans". (Proc. ASCE, WW3, Aug.) 1973.
- WALDEN, M.: "Die Eigenschaften der Meereswellen im Nordatlantischen Ozean, Statistic 10-jariger Seeboebactungen der Nordatlantischen Ozeanwitterschiffe". (Deutscher wetterdienst, seewetterant.) 1964.
- WATSON, G. S.: "Extreme Values in samples from m-dependent stationary stochastic processes". (Ann. Math. Stats, 25, 798, 1954.)