

## **Capítulo-II**

### **Grado de Afectación de un Huracán a un Ducto Submarino**

#### **II.1 Antecedentes**

En octubre de 1995, el huracán Roxanne se formó y se transformó en una tormenta de categoría 3 en la porción occidental del Mar del Caribe. Luego cruzó la Península de Yucatán e ingresó a la Bahía de Campeche. Roxanne pasó por el área de plataformas marinas en la Sonda de Campeche durante el periodo del 12 al 17 de octubre, se mantuvo semi estacionario por esa zona, generando condiciones meteorológicas y oceanográficas extraordinarias, debido al tiempo que permaneció en dicha zona (figura 9). Se registraron velocidades de viento sostenido de hasta 140 Km/h, altas mareas asociadas y alturas de ola que lograron alcanzar los accesorios y tuberías localizados bajo la cubierta principal de las plataformas, a una elevación de +15.85m.

Este huracán causó daños en plataformas y ductos, desde daños en accesorios como pasillos, barandales, escaleras, así como fallas en las conexiones de algunos elementos estructurales de las plataformas, hasta desplazamientos y rupturas en algunos ductos submarinos, incluyendo ductos ascendentes y tuberías sobre cubierta de plataformas.

#### **II.2. Descripción de los daños en las Instalaciones Costa Afuera de PEP**

Los daños que se presentaron en los ductos submarinos fueron severos ya que tres interconexiones de 8" de diámetro del anillo de bombeo neumático se colapsaron, siendo estas:

- Clave 9314 hacia Nohoch-B
- Clave 9306 hacia Akal-L
- Clave 9304 hacia Akal-N

Otros daños que se presentaron en los ductos, fue el desplazamiento lateral. El ducto clave 117 de 24" de diámetro, con dirección Nohoch-B hacia Nohoch-A Excompresión, fue afectado por un desplazamiento lateral de 230 metros que provocó un colapso y desconexión de un tramo de ducto y la curva de expansión en Nohoch-B (ver figura 10).

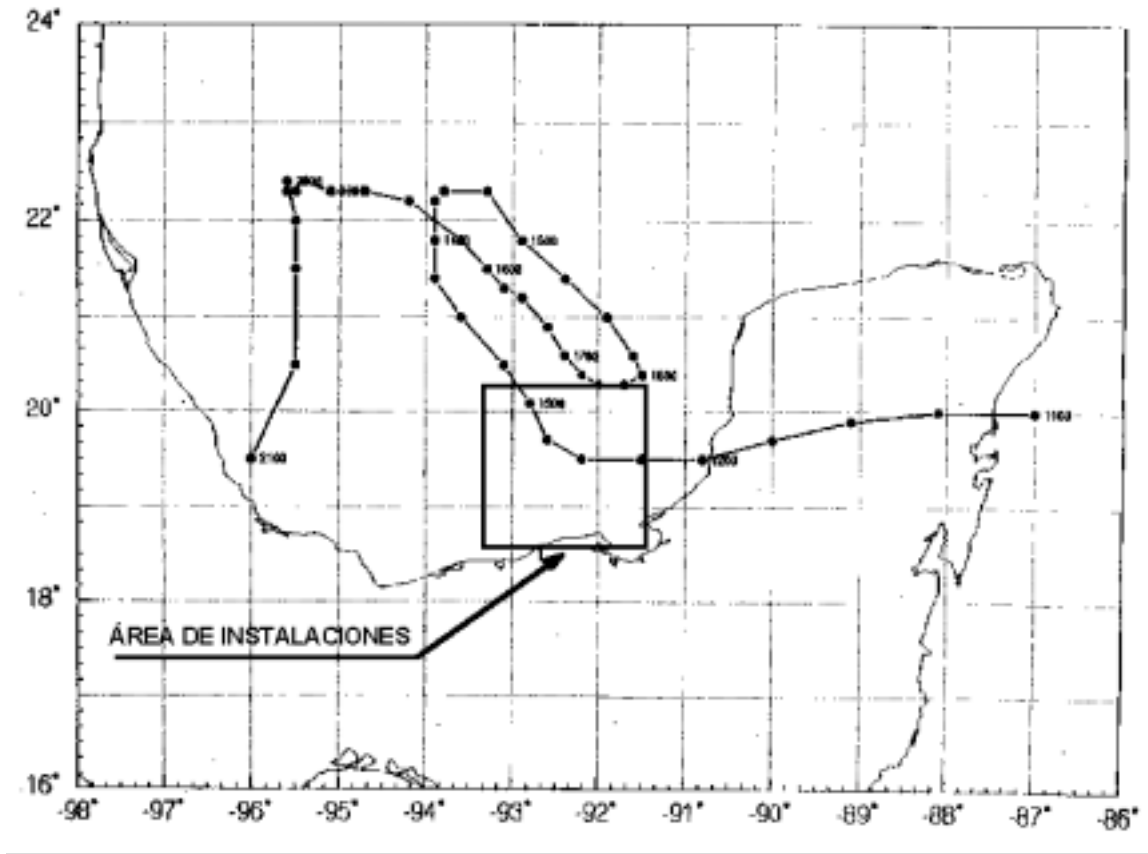


FIGURA 9.- TRAYECTORIA DEL HURACÁN Roxanne EN EL GOLFO DE MÉXICO, SONDA DE CAMPECHE.

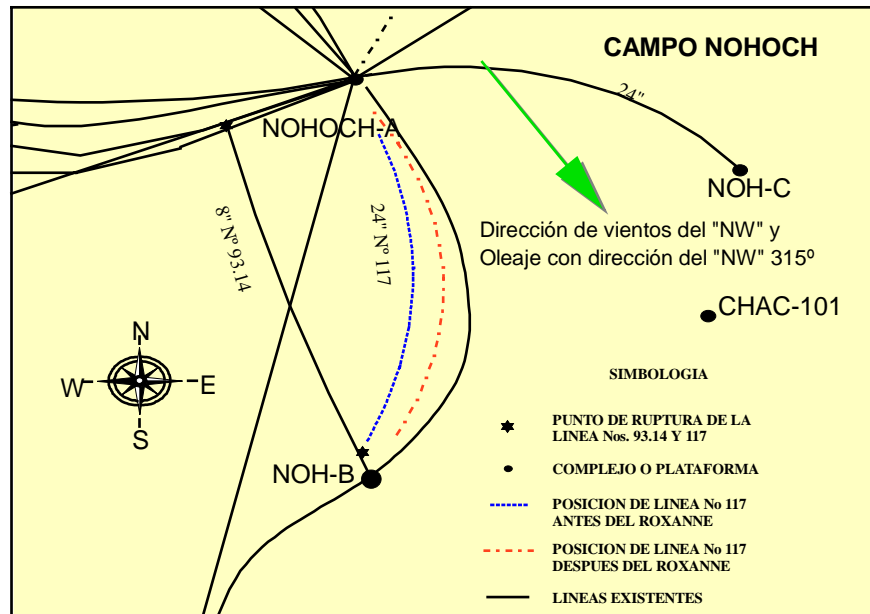


FIGURA 10.- DAÑOS EN DUCTOS SUBMARINOS PROVOCADOS POR EL PASO DEL HURACÁN ROXANNE EN OCTUBRE 1995.

El ducto clave 107 de 24" de diámetro, con dirección Akal-N hacia Akal-J Perforación que tenía un daño antes del paso del huracán consistente en un tramo de ducto levantado 2 metros del lecho marino por una longitud de 110 metros, la magnitud del daño se incrementó por los efectos del huracán quedando el ducto levantado 17 metros del lecho marino por una longitud de 300 metros. Por su importancia en el sistema de transporte de hidrocarburos, los ductos del anillo de bombeo neumático y los ductos 117 y 107 fueron reparados de manera inmediata, posterior al paso del huracán y una vez que se restablecieron las operaciones en el área de plataformas marinas.

Se presentó un caso de tres ductos que se desplazaron y quedaron encimados, estos ductos salen de Akal-G y arriban al complejo de producción de Akal-C. Estos ductos tienen por clave los números 016, 137 y 006, aunque esta última se encontraba fuera de operación.

Para verificar el estado de los ductos se llevó a cabo una campaña de inspección con equipo geofísico, dando como resultado la confirmación de desplazamientos en un total de 20 ductos submarinos, algunos de los cuales se encontraron semienterrados, considerándolos riesgosos ante la presencia de un futuro evento extraordinario, por los posibles problemas de estabilidad hidrodinámica.

**TABLA V.- DUCTOS SUBMARINOS CON DESPLAZAMIENTO PROVOCADO POR EL PASO DEL HURACÁN Roxanne.**

CLAVE	ORIGEN / DESTINO	DIAMETRO	LONGITUD	SERVICIO
077	Pool-A Compresión / Atasta	36"	65.679 Km	Gasoducto
076	Abkatum-A Compresión / Pool-A Compresión	36"	11.200 Km	Gasoducto
036	Nohoch-A Enlace / Abkatum-A Enlace	36"	19.000 Km	Gasoducto
024	Akal-J Enlace / Cayo Arcas Medición	36"	83.092 Km	Oleoducto
093	Nohoch-A Enlace / Nohoch-A Enlace	20"	20.700 Km	Gasoducto
027	Atasta / Nohoch-A Enlace	36"	82.245 Km	Gasoducto
9314	Anillo de Bombeo Neumático / Nohoch-B	8"	2.285 Km	Gasoducto

CLAVE	ORIGEN / DESTINO	DIAMETRO	LONGITUD	SERVICIO
9306	Anillo de Bombeo Neumático / Akal-L	8"	4.928 Km	Gasoducto
9304	Anillo de Bombeo Neumático / Akal-N Perforación	8"	2.458 Km	Gasoducto
117	Nohoch-B / Nohoch-A Excompresión	24"	2.595 Km	Gasoducto
107	Akal-N Perforación / Akal-J Perforación	24"	2.000 Km	Gasoducto
9313	Anillo de Bombeo Neumático / Akal-R	8"	2.628 Km	Gasoducto
127	Akal-L / Ku-A Enlace	8"	15.000 Km	Gasoducto
016	Akal-G Perforación / Akal-C Enlace	14"	2.271 Km	Gasoducto
138	Akal-J Compresión / Akal-O	8"	2.600 Km	Gasoducto
137	Akal-C Compresión / Akal-G Perforación	8"	2.300 Km	Gasoducto
081	Akal-G Perforación / Akal-C Producción Temporal 3	36"	3.557 Km	Oleoducto
082	Akal-F / Akal-J Prod. Temp. 3	36"	3.258 Km	Gasoducto
126	Ku-H / Ku-A Enlace	8"	9.000 Km	Gasoducto
140	Balam-1 / Akal-C Prod. Temp. 1	24"	13.300 Km	Oleogasoducto

### II.3. Criterio de Evaluación

Los daños provocados en la infraestructura de PEMEX Exploración y Producción por el paso del huracán generó la necesidad de evaluar la integridad estructural de las instalaciones marinas, tanto de las plataformas como de los ductos.

La falta de experiencia a nivel mundial y la falta de un documento normativo específico para la evaluación de ductos submarinos y ascendentes creó la necesidad de implementar un documento normativo con base en los siguientes códigos de diseño:

- API-RP-1111: Recomendaciones prácticas para diseño, construcción y mantenimiento de tuberías de hidrocarburos.
- DNV-76 y 81: Recomendaciones para diseño, construcción e inspección de tubería submarina y ductos ascendentes.
- Criterios de diseño de PEMEX e IMP.
- ASME/ANSI B31.8: Código para sistemas de tuberías de transmisión y distribución de gas.
- ASME/ANSI B31.4: Código para sistemas de tuberías de transportación de hidrocarburos líquidos.

Sin embargo, como todos los documentos listados son para diseño, el criterio de evaluación que se propuso quedó integrado con los siguientes principios:

- ✓ No aceptación de que el acero incurriere en el rango inelástico.
- ✓ Los factores de seguridad de la evaluación se establecen en función de los factores recomendados en los códigos de diseño.
- ✓ Si los factores de seguridad para el caso de estabilidad hidrodinámica y la relación de esfuerzos son inadecuados, se crea la necesidad de elaborar una ingeniería para reparación o de implementar medidas que reduzcan el riesgo de falla de manera temporal.

Al finalizar el proyecto de evaluación tanto de plataformas como de ductos con la normatividad disponible, se obtuvieron requerimientos de reparación y aplicación de medidas mitigantes muy costosas. Por lo tanto, se retomó la necesidad de contar con información meteorológica y oceanográfica propia de la Sonda de Campeche, para poder establecer un criterio propio para el diseño y la evaluación de instalaciones marinas en la Sonda de Campeche.

En 1998 se generó el Criterio Transitorio para el Diseño y la Evaluación de Líneas Submarinas en la Sonda de Campeche, el cual está basado en la filosofía de la administración del riesgo (Bea, 1997, Bea, 1998), a partir del establecimiento de probabilidades de falla aceptables y factores de seguridad donde los sesgos e incertidumbres de cada parte del proceso de análisis son considerados de manera explícita. Posteriormente, después de varias revisiones, este criterio dio origen a la norma de referencia No. NRF-013-PEMEX-2000 denominada Evaluación de Líneas Submarinas en el Golfo de México, Rev. 0, Edición 15 de abril 2001.

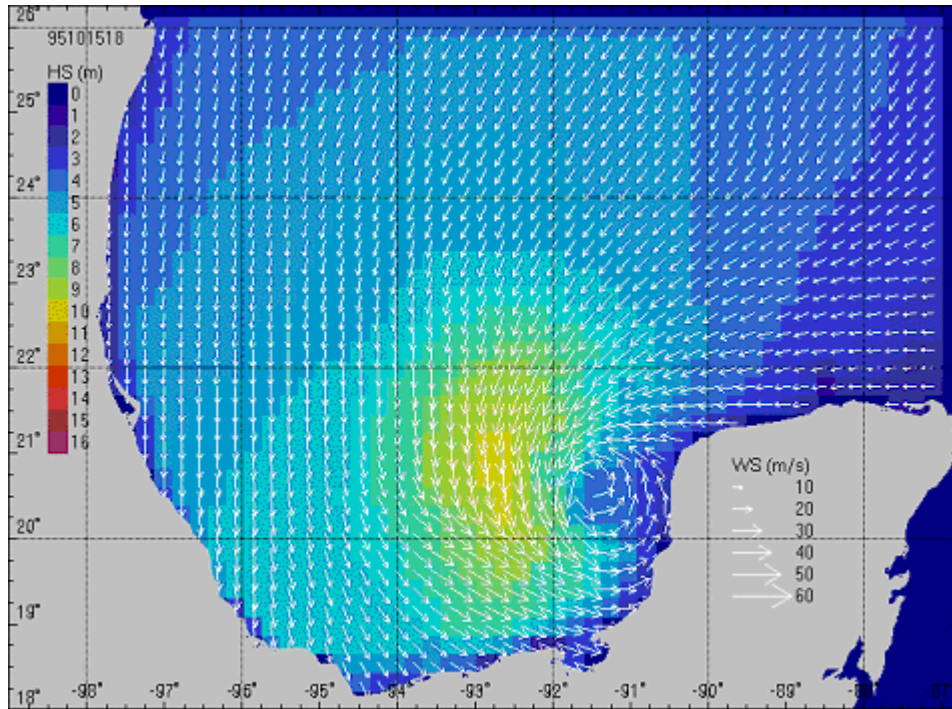
#### II.4. Análisis de Datos Meteorológicos y Oceanográficos en la Sonda de Campeche

- Durante 1976 a 1979, el Centro de ciencias del Mar y Limnología de la UNAM realizó una campaña de medición de variables meteorológicas en la estación de investigaciones marinas "El Carmen".
- En 1983 el Instituto Mexicano del Petróleo realizó un estudio para determinar la caracterización oceanográfica de la Sonda de Campeche.
- En 1993, Oceanweather realizó un estudio de reproducción histórica de tormentas (hindcast) y de las condiciones meteorológicas y oceanográficas normales y extremas de la parte oriental de la bahía de Campeche en el Golfo de México.
- En junio de 1993, PEMEX inició un programa de mediciones meteorológicas y oceanográficas en dos sitios con profundidades de 150 y 300 metros. El programa terminó en 1995.

En las fechas en que el huracán Roxanne pasó por la Sonda de Campeche, no se habían instalado instrumentos de medición meteorológica y oceanográfica, por lo que en 1997 PEMEX solicitó a Oceanweather, realizar un estudio para la actualización de la reproducción histórica de huracanes para el Golfo de México en la parte de la Sonda de Campeche, con la finalidad de ayudar a identificar la magnitud de las fuerzas que provocaron los daños en las instalaciones petroleras.

El estudio consideró una población estadística de 22 tormentas de invierno que se registraron durante el periodo 1956-1992, también se incluyeron 47 huracanes de importante magnitud que afectaron la porción sur del Golfo de México entre 1931 y 1996.

Los parámetros característicos de cada tormenta fueron obtenidos para los puntos discretos de una malla que cubre la totalidad del Golfo de México (figura 11) y archivados para un área que cubre la extensión de las aguas territoriales. Los puntos discretos están espaciados a cada 12 millas náuticas.



**FIGURA 11.- MODELACIÓN NUMÉRICA DEL HURACÁN ROXANNE**

Con los datos obtenidos se creó un criterio para evaluación de líneas submarinas en el Golfo de México, que posteriormente se formalizó como norma de referencia de PEMEX, asignándosele el número NRF-013-PEMEX-2000.

Las condiciones ambientales más representativas de la Sonda de Campeche están definidas en los puntos: 261 (Nak-1, Rebomero), 340 (Och), 341 (Abkatum, Chuc-B, Pol), 342 (Caan), 419 (Ku, Ixtal-1), 420 (Akal, Balam, Ek, Batab, Ixtoc, Taratunich D1-2), 421 (Nohohc-A) y 422 (Nix-1), que se muestran en figura 12.

Para los ductos submarinos, la información meteorológica y oceanográfica para la revisión de la estabilidad hidrodinámica, se expresó en forma continua a través de valores promedio, variando con la profundidad, lo cual ofrece una ventaja para localizar parámetros ubicados en puntos específicos en la ruta de las tuberías, (figuras 13 - 18).

Debido a que el modelo de reproducción histórica empleado no contaba con la resolución suficiente para resolver el problema del comportamiento de las corrientes en tres dimensiones (variación con la profundidad), fue necesario implementar nuevos modelos que adicionalmente proporcionaran información para la revisión de los arribos de los ductos que

transportan hidrocarburos a tierra. La definición de las velocidades de corriente se realizó utilizando tres enfoques diferentes según la profundidad del agua. Primero, para aguas con profundidades menores a 40 m conocidas como aguas someras, la velocidad de corriente se obtuvo directamente del modelo de reproducción histórica, pero ajustando las velocidades por efectos de fondo. En aguas profundas (tirantes mayores a 100 m) se emplearon diferentes modelos dependiendo del tipo de tormenta a considerar. En el caso de huracanes se empleó un modelo de uso comercial propuesto por Forristal en 1991. En el caso de tormentas de invierno se utilizó una estimación empírica basada en la velocidad del viento, que considera que la velocidad de la corriente en la superficie es igual a 0.027 veces la velocidad del viento a 10 m de altura del nivel del mar, y se consideró una variación exponencial de la corriente con la profundidad. La corriente de fondo se agregó a la corriente inducida por el viento en todas las profundidades. Finalmente, para profundidades de agua intermedias (de 40 a 100 m), el perfil vertical de corrientes se intercaló entre los dos modelos anteriores.

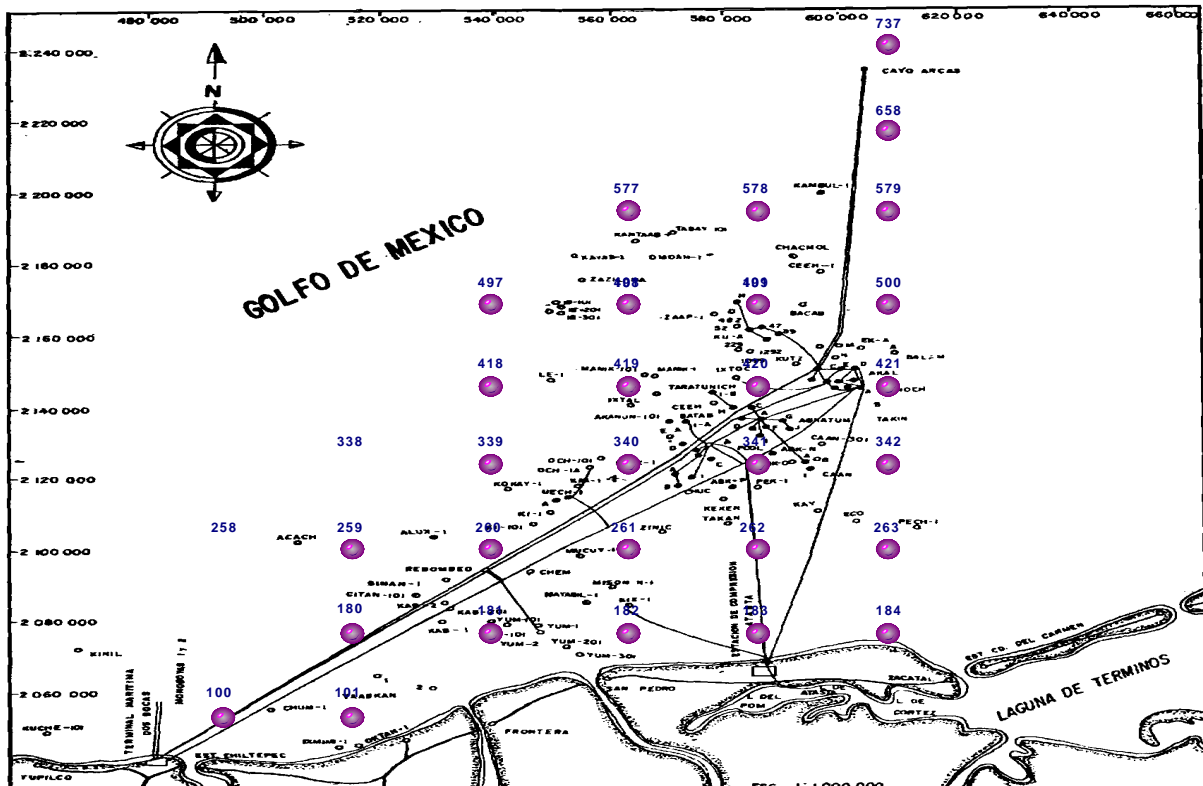


FIGURA 12.- CONDICIONES AMBIENTALES REPRESENTATIVAS DE LA SONDA DE CAMPECHE OBTENIDAS DEL ESTUDIO DE OCEANWEATHER.



De acuerdo con la norma NRF-013-PEMEX-2000, los parámetros de diseño correspondientes a un período de retorno de 100 años se deberán emplear para garantizar la estabilidad del ducto durante la fase permanente, mientras que los parámetros asociados a un período de retorno de 10 años se deberán aplicar para la fase temporal (etapa de instalación).

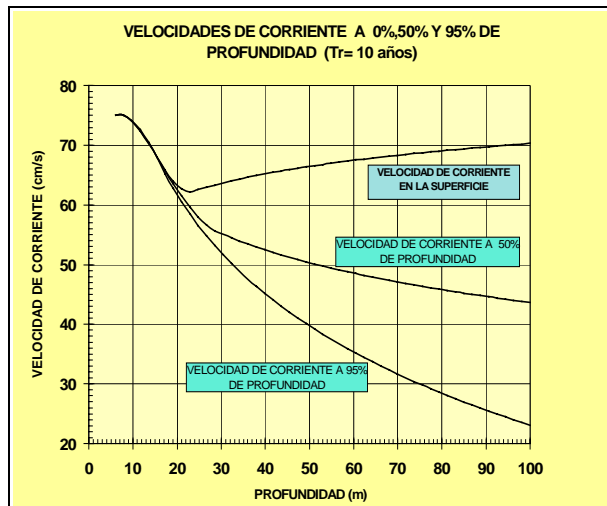


FIGURA 13.- VELOCIDADES DE CORRIENTE A 0%, 50% Y 95% DE PROFUNDIDAD (Tr = 10 AÑOS).

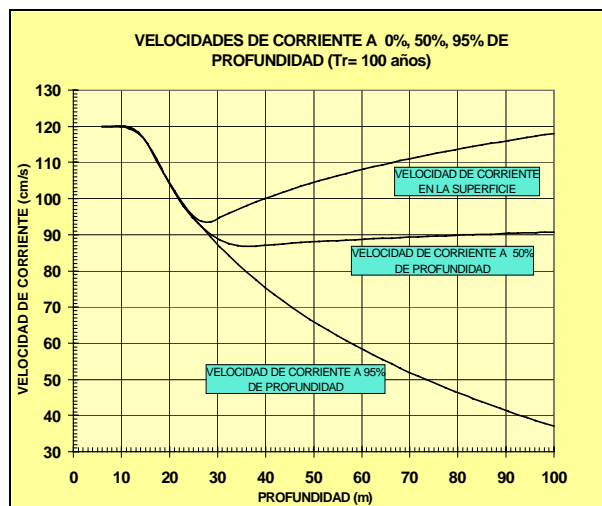


FIGURA 14.- VELOCIDADES DE CORRIENTE A 0%, 50% Y 95% DE PROFUNDIDAD (Tr = 100 AÑOS).

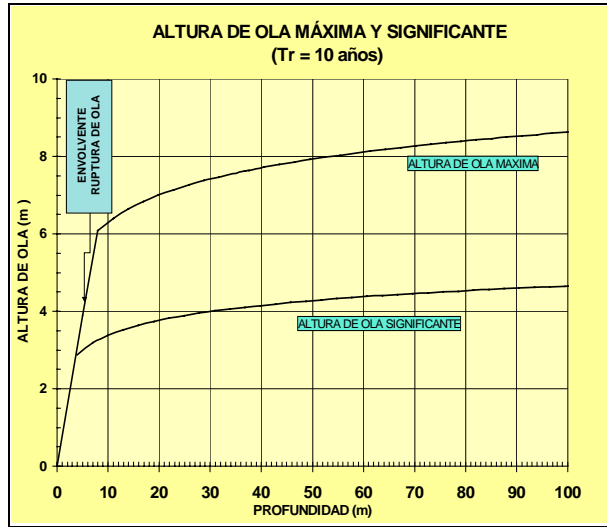


FIGURA 15.- ALTURA DE OLA MÁXIMA Y SIGNIFICANTE, (Tr = 10 AÑOS).

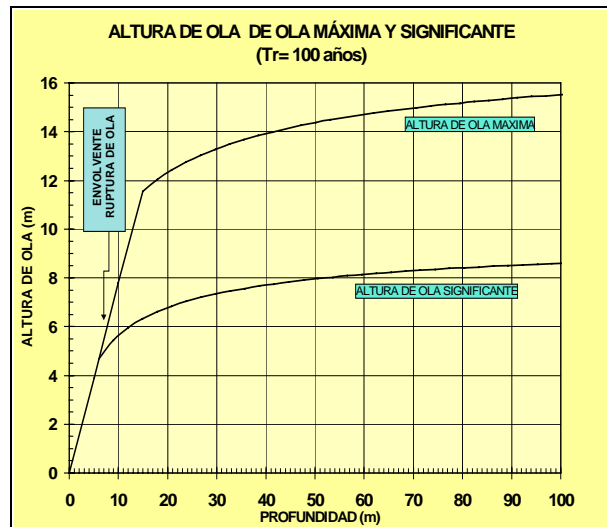


FIGURA 16.- ALTURA DE OLA MÁXIMA Y SIGNIFICANTE, (Tr = 100 AÑOS).



FIGURA 17.- ALTURA DE LA MAREA DE TORMENTA, (Tr = 10 AÑOS).

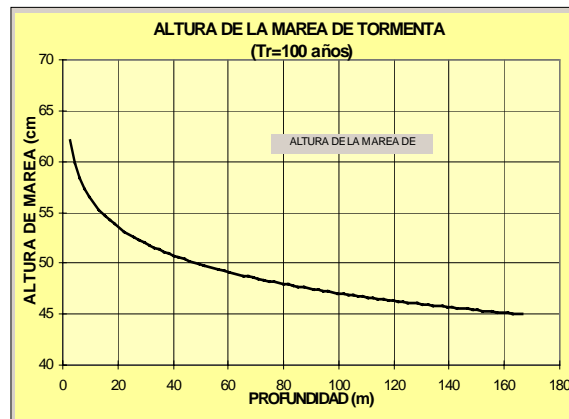


FIGURA 18.- ALTURA DE LA MAREA DE TORMENTA, (Tr = 100 AÑOS).