



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Estimación del oleaje por eventos extremos no tropicales (Nortes) en el Golfo de México

Manuel Mendoza Grande
Rodolfo Ramírez Xicotencatl
María de Lourdes Méndez Reyes

Publicación Técnica No. 754
Querétaro, México
2023

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, por el M. en I. Manuel Mendoza Grande, el Ing. Rodolfo Ramírez Xicotencatl y por la Ing. Arq. María de Lourdes Méndez Reyes.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna VI-05/23 “Estimación del oleaje inducido por eventos extremos no tropicales (Nortes) en el Golfo de México”.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores (as) y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Instituto Mexicano del Transporte.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción	1
1. Análisis del estado del arte.....	5
2. Recopilación de la información	9
2.1 Batimetría global.....	9
2.1.1 EMODET	9
2.1.2 GEBCO.....	10
2.1.3 ETOPO	12
2.1.4 Modelos Digitales Batimétricos	13
2.2 Campos de viento global.....	14
2.2.1 Configuración del modelo WAVEWATCH	14
3. Modelaciones numéricas.....	21
3.1 Modelo numérico.....	21
3.2 Malla de cálculo.....	23
3.3 Calibración del modelo numérico.....	24
3.3.1 Oleaje	25
3.4 Análisis extremal.....	30
3.4.1 Distribución Exponencial.....	30
3.4.2 Distribución Gumbel.....	30
3.4.3 Distribución Weibull.....	31
3.4.4 Distribución Frechet.....	31

3.4.5	Distribución Rayleigh	31
3.4.6	Ajuste por mínimos cuadrados ortogonales	31
4.	Análisis e interpretación de los resultados	47
	Conclusiones.....	57
	Bibliografía	59
	Anexo 1 Tablas de eventos Nortes.....	63
	Anexo 2 Gráficas de altura de ola vs períodos de retorno.....	105

Sinopsis

En el presente estudio se reprodujo, mediante modelos numéricos de propagación de oleaje de última generación, el oleaje generado por el efecto de eventos extremos no tropicales “Norte” en el Golfo de México, fenómenos que pueden durar de uno a dos días y los cuales se han incrementado en las últimas décadas, con vientos superiores a 100 km/h.

Debido a que en la zona costera del Golfo de México existen obras de infraestructura portuaria muy importante para el país, es primordial conocer las características del oleaje que se produce por efecto de los eventos “Norte”, en este sentido, los modelos numéricos de propagación de oleaje se han convertido en una herramienta ampliamente utilizada en los últimos años, que permite estimar el oleaje que se propaga hacia la costa.

El objetivo de este estudio es generar mapas de oleaje producidos por eventos extremos no tropicales (Nortes) en el Golfo de México asociados a diferentes periodos de retorno e identificar zonas de alto impacto para la infraestructura portuaria y costera de México.

Abstract

In the present study it was reproduced, using the latest generation waves propagation models, the waves generated by the effect of extreme non-tropical events (North) in the Gulf of Mexico, phenomena that can last from one to two days and which have been increasing in recent decades, with winds above 100 km/h.

Due to the fact in the coastal zone of the Gulf of Mexico there are very important port infrastructure works for the country, it is essential to know the characteristics of the waves that produced by "North" events. In this sense, the numerical models of wave propagation have become widely used tools in recent years, which allow estimating the waves that propagate towards the coast.

The objective of this study is to generate wave maps produced by extreme non-tropical events (Norths) in the Gulf of Mexico associated with different return periods and to identify areas of high impact for the port and coastal infrastructure of Mexico.

Introducción

Un evento de “Norte” es un fenómeno meteorológico caracterizado por fuertes vientos fríos que se producen cuando una masa de aire frío se desplaza de norte al sur. Estos eventos suelen ocurrir en las regiones costeras del norte de México y el sur de Estados Unidos (ver figura I.1), los cuales generan cambios en la temperatura, lluvias intensas y vientos de gran intensidad.

A pesar de los inconvenientes que pueden causar, los eventos de “Norte” también son beneficiosos, ya que ayudan a renovar el aire y a disminuir la contaminación en las zonas afectadas. Además, pueden traer consigo una disminución en la humedad y una sensación de frescor en el ambiente.



Fuente: Comisión Nacional del Agua

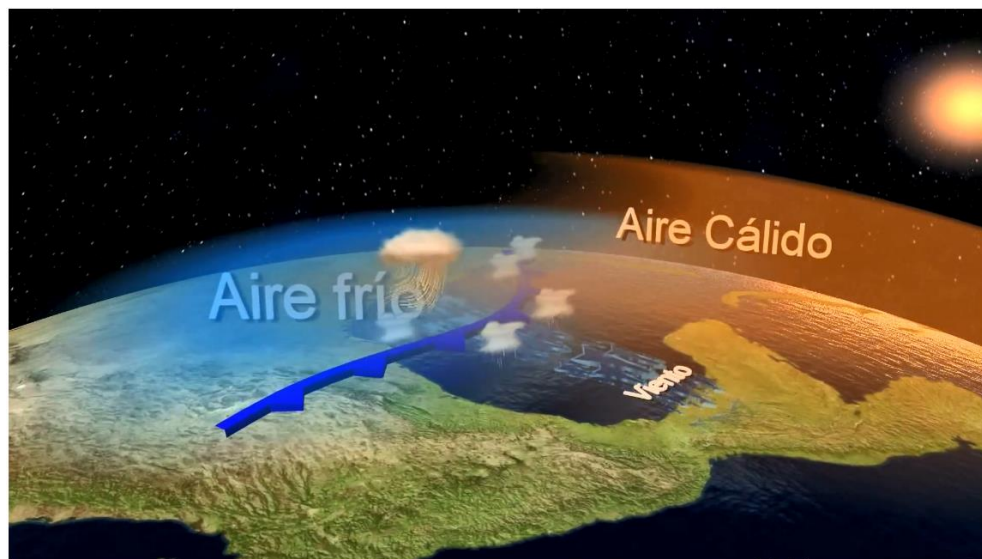
Figura I.1 Masas de aire frío que pasan por el Golfo de México

Cuando estas dos masas de aire colisionan, la masa de aire caliente asciende debido a que es menos densa, y esta forma una zona de baja presión. Al mismo tiempo, la masa de aire frío se desplaza hacia el frente de la masa de aire caliente, la cual crea una zona de alta presión (ver figura I.2).

Estos eventos suelen ser más comunes en invierno, pero también pueden ocurrir en otras épocas del año. Durante un evento de Norte, las temperaturas descienden considerablemente, y en ocasiones provoca las

llamadas “heladas”. Además, es posible que se produzcan lluvias intensas y con posibilidad de tormentas eléctricas.

Los vientos asociados a un evento de “Norte” suelen ser muy fuertes, y alcanzan velocidades de hasta 100 km/h. Estos vientos pueden ocasionar daños en la costa, árboles y tendido eléctrico, así como dificultades en la navegación marítima.



Fuente: Comisión Nacional del Agua

Figura I.2 Cambios de la atmósfera al combinarse masa de aire frío con una cálida

Nuestro país está dominado por montañas y planicies, las cuales juegan un papel muy importante en el comportamiento del clima. Desde Coahuila hasta Oaxaca, existe una cadena montañosa denominada “Sierra Madre Oriental” que tienen en promedio de 2000 a 3000 metros sobre el nivel del mar, y el cual limita el aire cálido y húmedo del Golfo de México y el aire seco y semifrío que prevalece en el Golfo de México y en el Altiplano desde Chihuahua hasta el Valle de México.

La fuerza de los vientos a lo largo del año, y a medida que el otoño se acerca al invierno, la mayoría de los estados en la vertiente oriental del país hasta la Península de Yucatán se encuentran en periodos de fuertes vientos.

De septiembre a mayo de cada año, el aire frío que domina el Polo Norte comienza a moverse más al sur, el cual alcanza la mayor parte del territorio nacional. Estas masas frías generalmente son movidas desde el centro y oeste de Estados Unidos hacia México por un sistema de alta presión importante que tiene una circulación a favor de las manecillas del reloj. Éstas, al ingresar en el Golfo de México, favorecen al aumento de las

intensidades del viento debido a la fricción (el viento corre libremente sobre superficies lisas) y el aumento de presión (cuanto mayor es el cambio de presión en un área pequeña, más fuerte el viento).

La circulación del sistema origina la dirección característica del Norte, con duraciones promedio de uno a dos días y rachas de 80 a 100 km/h, y estas ocurren generalmente en la parte central del estado de Veracruz, entre la zona de Laguna Verde y el puerto de Veracruz (ver figura I.3).



Fuente: Periódico Imagen de Veracruz

Figura I.3 Vientos fuertes en el puerto de Veracruz

Otro caso más significativo se da en el Istmo de Tehuantepec, especialmente en la zona de la Ventosa, Oaxaca, donde se da presenta el efecto Venturi: los vientos provenientes del Golfo de México se acumulan en los límites entre la Sierra de Oaxaca y de Chiapas, y existe un pequeño espacio libre donde el viento se acumula y genera presión para encontrar una salida. En dicha salida pueden alcanzar o superar los 150 km/h y, a veces, puede durar varios días.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN), es la entidad gubernamental encargada de monitorear y pronosticar el clima en México, y además cuenta con una clasificación oficial para los eventos de “Norte”, los cuales están definidos en cinco categorías, las cuales son:

- Moderados, que van de los 20 a 38 km/h.
- Fuertes, que van de los 39 a 61 km/h.
- Muy Fuertes, que van de los 62 a 88 km/h.
- Intensos, que van de los 89 a 117 km/h.
- Severos, que van de > 118 km/h.

1. Análisis del estado del arte

Los eventos no tropicales (Nortes) en México, presentan problemas principalmente en las estaciones de otoño a primavera, con un pico en la estación invernal, y estos generan una drástica disminución de la temperatura, aumento de la magnitud del viento y mayores precipitaciones.

El conocimiento de los eventos Norte se encuentran en constante evolución debido a los avances en la tecnología de observación y modelado atmosférico. A continuación, se muestran algunas fuentes de información que pueden ayudar comprender sobre dicho tema.

- Mojena, E., et al. (2004), describe en su artículo “Pronóstico del desplazamiento de los frentes fríos sobre el Golfo de México, Península de Yucatán y región occidental de Cuba. Campo de viento y lluvia asociado” el análisis de los frentes fríos a través de satélites para dar seguimiento y evaluar los riesgos producidos por dichos fenómenos.
- Méndez, J. (2013), realizó un análisis del “Perfil termodinámico para un evento de Norte en el Puerto de Veracruz”, en el cual describió el perfil termodinámico antes, durante y después del paso de un Norte en el Puerto de Veracruz y contribuyó al conocimiento de la estructura de estos fenómenos meteorológicos.
- López, J. (2009), desarrolló la tesis “Análisis del evento meteorológico del 2007 relacionado con la inundación de Tabasco”, el cual describe los daños provocados por un frente frío a una plataforma petrolera en el Golfo de México y las inundaciones que se presentaron en el sureste de la República Mexicana. Para conocer y estudiar las condiciones meteorológicas utilizó el modelo meteorológico *Weather Research and Forecasting Model*, y con el cual reprodujo con bastante precisión las condiciones meteorológicas que ocasionaron los vientos intensos sobre el Golfo de México en el mes de octubre de 2007.
- Oria, E. (1982), en el artículo “Determinación del movimiento de los frentes en el Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México, mediante el empleo de los satélites meteorológicos”, presentó el estudio de los frentes fríos y de las características de sus movimientos que se presentan al cruzar en el Golfo de México, y en este artículo se apoyó

con imágenes satelitales del ESSA-8 y de mapas de superficie, con la información antes expuesta, el autor esperó tener la probabilidad de hallar algunas relaciones entre los distintos factores que intervienen en el movimiento de los frentes fríos.

- González, J. (2016), desarrolló su tesis “Formación y dinámica de frentes fríos”, en la cual describe la formación y tipos de frentes fríos: como se originan en las zonas polares, se propagan hacia altitudes menores y afectan grandes regiones geográficas, de igual forma, analizó un frente frío y su relación con una tormenta de nieve que afectó gran parte de Estados Unidos.
- Calderón, O. (2017), desarrolló la tesis “Respuesta dinámica del Golfo de México al paso de un frente frío intenso (caso del frente frío No. 4 de 2007)”, en dicho documento describió el comportamiento de la circulación y el nivel del mar en el Golfo de México al paso del frente frío número 4 de la temporada de 2007-2008, para lo cual, realizó modelaciones numéricas de los vientos y de la dinámica del océano, el cual utilizó los modelos Weather Research and Forecasting (WRF) y Navy Coastal Ocean Model (NCOM).
- En el boletín del Servicio Mareográfico Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM del 9 de marzo de 2021, “Registro de variaciones del mar asociadas a los frentes fríos número 39 y 40”, se hace mención de los registros de los niveles del mar al paso de los frentes fríos, y en la zona de Telchac, Yuc., se observó una sobreelevación del nivel del mar de 30 cm., respecto al pronóstico de marea en dicho sitio.
- En la tesis “Respuesta de la circulación oceánica ante el forzamiento de eventos de Norte en la zona del Sistema Arrecifal Veracruzano”, Rojas, J. (2008), analizó la respuesta de la circulación oceánica en la zona del Sistema Arrecifal Veracruzano el cual utilizó el modelo numérico de circulación NCOM.
- En el estudio “Metodología para la creación e implementación del sistema de alerta temprana para frentes fríos y norte, informe final”, Prieto, R. (2008), planteó la metodología necesaria para la creación e implementación de un sistema de alertamiento ante frentes fríos, apoyándose con un modelo de Mesoescala (MM5) y el modelo WRF.

Como se puede observar en los estudios de los eventos extremos no tropicales antes indicados, se han realizado esfuerzos por reproducir las condiciones climatológicas con modelaciones numéricas e incluso análisis para investigar los cambios en su dinámica con el calentamiento global.

Sin embargo, en la actualidad, no hay investigaciones relacionadas con el tema de las características del oleaje producido por eventos de Norte para el Golfo de México.

2. Recopilación de la información

2.1 Batimetría global

Conocer el fondo del mar es una de las partes fundamentales para estimar la circulación oceánica, las mareas, el pronóstico de los efectos de un tsunami, el transporte de sedimentos, las corrientes litorales, etc.

Para realizar modelos de propagación de oleaje, es importante definir estas profundidades, las cuales, por ser a nivel global, se tienen que buscar este tipo información por diferentes fuentes, como son: EMODnet, GEBCO, E-Topo, MDB.

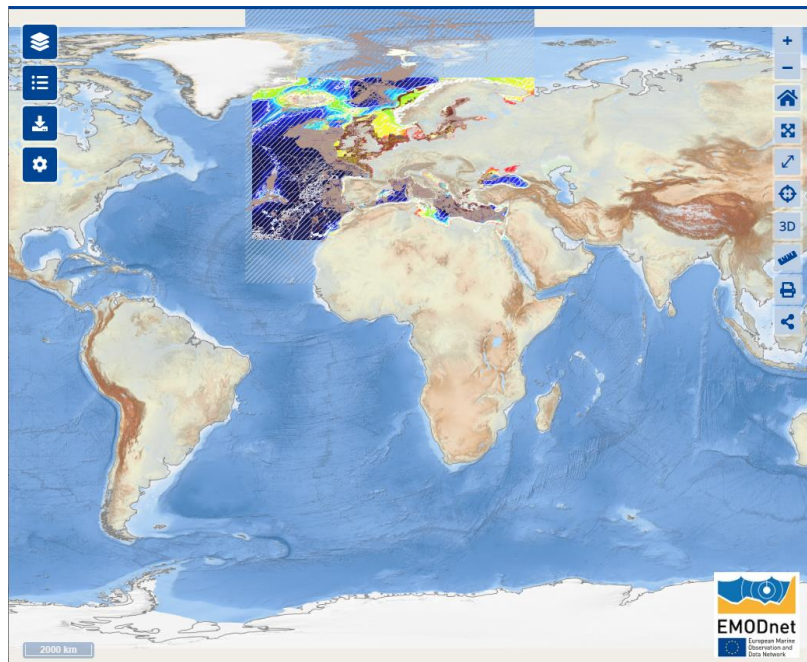
2.1.1 EMODET

La European Marine Observation and Data Network (EMODnet), en su página de internet, se puede descargar información batimétrica, y el cual utiliza un Modelo Digital de Terreno (MDT) para las regiones marítimas europeas, y además cuenta, con una variedad de otros datos y productos. Este tipo de modelo, es actualizado periódicamente por la asociación EMODnet (ver figura 2.1).

La información batimétrica de EMODnet, está a cargo de organizaciones de ciencias marinas, departamentos gubernamentales, servicios hidrográficos, etc. Reúne conjunto de datos batimétricos in situ, MDT compuestos y productos de batimetría de imágenes satelitales.

La información batimétrica de EMODnet está compuesta por una cuadrícula de 1/16 x 1/16 minutos de arco, además contiene información batimétrica de alta resolución que puede variar entre 1/32 y 1/512 minutos de arco.

EMODnet cuenta con un visualizador (EMODnet Map Viewer), en el cual se puede acceder a su visor de mapas y poder descargar la información batimétrica del área seleccionada. En dicho visor cuenta con varias capas en donde se puede definir la información que requiera descargar.



Fuente: EMODnet.

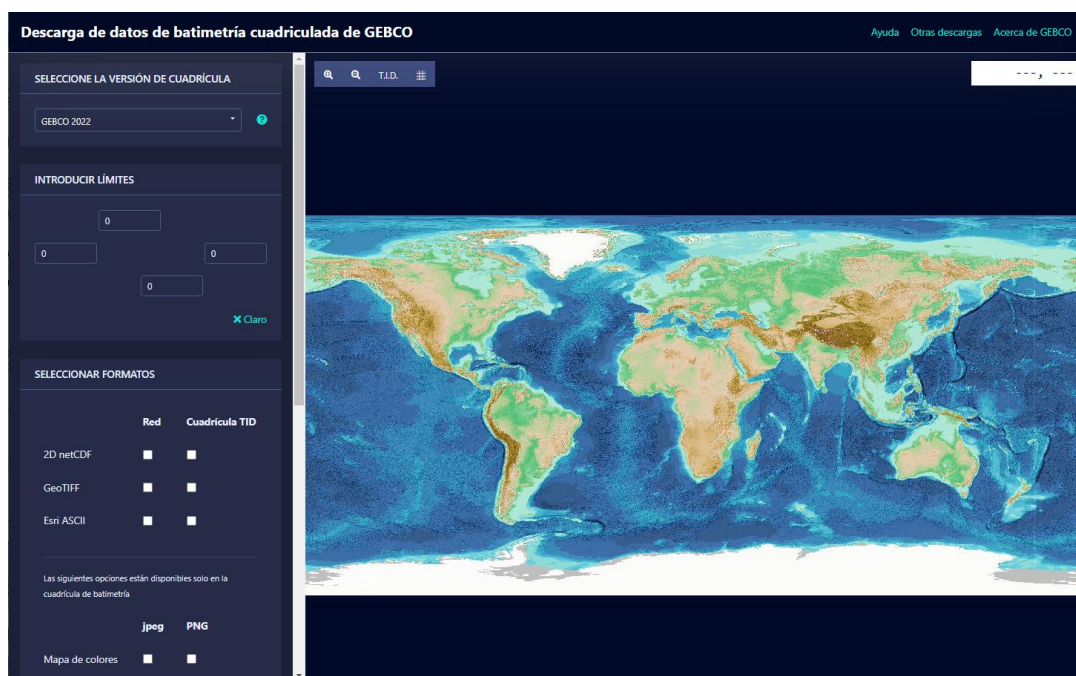
Figura 2.1 Información batimétrica del EMODnet

2.1.2 GEBCO

General Bathymetric Chart of the Ocean (GEBCO), es una organización sin fines de lucro que depende en gran medida de contribuciones voluntarias y cuenta con el apoyo de comités de cartografía oceánica (ver figura 2.2).

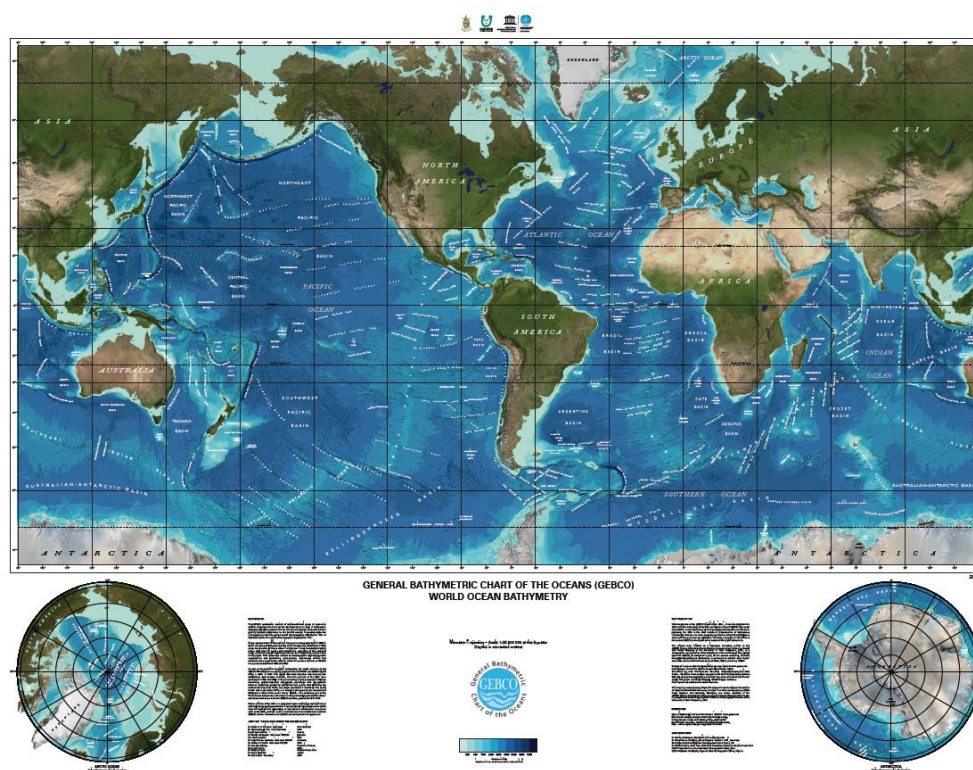
GEBCO produce una gran variedad de conjunto de datos y productos batimétricos, el cual incluye el conjunto de datos batimétricos cuadriculados a nivel mundial. La cuadrícula actual de GEBCO son de un modelo de terreno global para el océano y la tierra, su información está en metros y su intervalo es de 15 segundos de arco (ver figura 2.3).

Cuenta con una aplicación para seleccionar y descargar datos en diferentes formatos. La red GEBCO es de dominio público y puede utilizarse en forma gratuita.



Fuente: GEBCO

Figura 2.2 Aplicación para obtener la Información batimétrica de GEBCO



Fuente: GEBCO

Figura 2.3 Batimetría general de los océanos de GEBCO

2.1.3 ETOPO

El ETOPO contiene información del modelo del relieve mundial de la superficie de la tierra ETOPO 2022 de la National Geophysical Data Center de los Estados Unidos de Norteamérica (NGDC), el cual es un modelo de relieve global de 15 arco segundos de resolución geográfica de la superficie de la Tierra que integra la topografía terrestre y la batimetría oceánica, referenciado verticalmente al nivel medio del mar y horizontalmente al Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS 84) (ver figura 2.4).

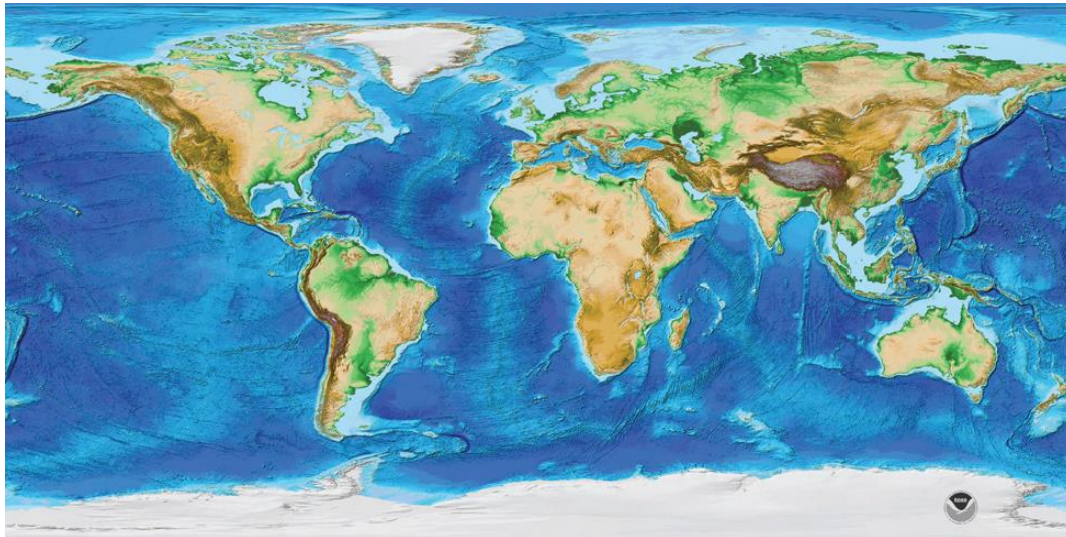


Figura 2.4 Modelo de relieve global de superficie ETOPO 2022

Dicho modelo fue construido a partir de conjuntos de datos globales y regionales que fueron modificados, evaluados y editados a datos comunes, horizontales y verticales, obtenidos de las agencias NGDC, Antarctic Digital Database (ADD), European Ice Sheet Modeling Initiative (EISMINT), Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR), Japan Oceanographic Data Center (JODC), Caspian Environment Programme (CEP), Mediterranean Science Commission (CIESM), National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Snow and Ice Data Center (NSIDC), Scripps Institute of Oceanography (SIO) and Leibniz Institute for Baltic Sea Research (LIBSR).

De esta fuente de información, se obtuvieron las profundidades de la zona comprendida entre las coordenadas 14.5° de latitud Norte, 100° de longitud Oeste y 31.5° de latitud Norte, 78° de longitud Oeste (Figura 2.5).

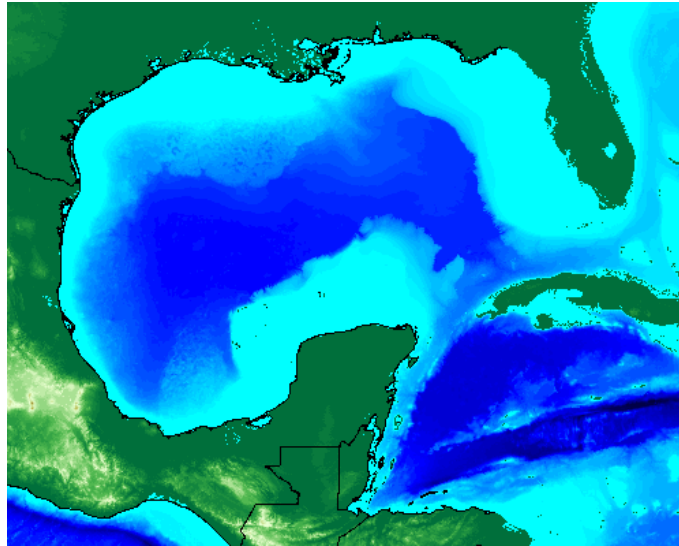


Figura 2.5 Información batimétrica de ETOPO 2022 utilizada en este estudio

2.1.4 Modelos Digitales Batimétricos

Los Modelos Digitales Batimétricos (MDB) de relieve submarino de la zona exclusiva de México, es desarrollado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), los cuales tienen una resolución de 400 metros por pixel a una escala de 1:1'000,000 (ver figura 2.6).

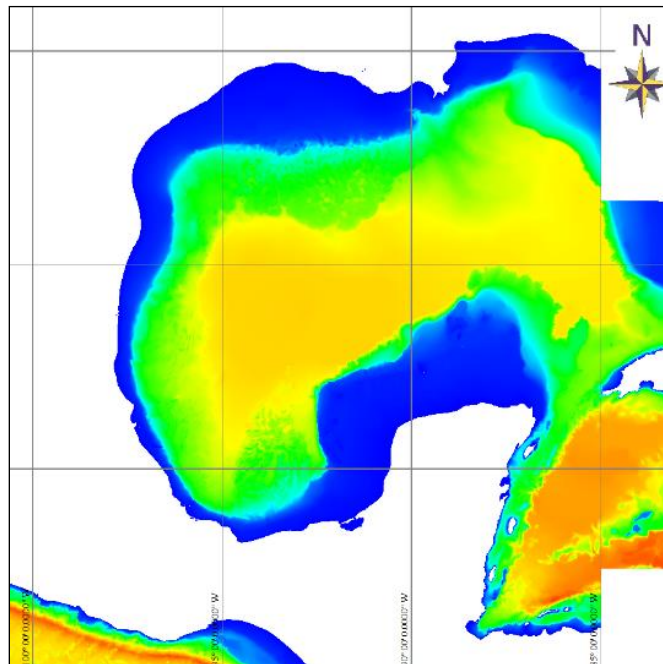


Figura 2.6 Información batimétrica de MDB utilizada en este estudio

2.2 Campos de viento global

Conocer el viento que se genera en un determinado tiempo, es parte fundamental en las modelaciones de generación y propagación de oleaje. Obtener el campo de viento que circuló en un determinado lugar es muy importante para definir las condiciones iniciales en los modelos numéricos.

Para encontrar los registros de la información de viento, esta fue obtenida de la base de datos Wavewatch III, los cuales corresponden a la velocidad máxima de viento en eventos extremos no tropicales (Nortes).

El WAVEWATCH III® 30 años Hindcast Fase 2, es un base de datos de oleaje y viento de 30 años, generada por la NOAA, el cual utiliza un modelo de tercera generación desarrollado por Ardhuin et al (2010), y está basado en el modelo WAM (WAMDIG 1988, Komen et al. 1994), se ejecuta en un mosaico de 16 mallas de cálculo regulares (en latitud y longitud) con interacción bidimensional entre las cuadrículas de mayor y menor resolución, y su base de datos horaria es en alta resolución de viento correspondiente al Reanálisis y Predicción del Sistema de Pronóstico Climático (CFSRR por sus siglas en inglés).

El dominio espectral del WAVEWATCH está dividido en 50 intervalos de frecuencia y 36 intervalos direccionales (resolución direccional de 10°). La frecuencia mínima es de 0.035 Hz y el factor de incremento de frecuencia es de 1.07, el cual proporciona un rango de frecuencia de 0.035–0.963. El período que cubre la base de datos es de 41 años de 1979 a 2019.

2.2.1 Configuración del modelo WAVEWATCH

Los modificadores que se utilizaron en la etapa del desarrollo de la base de datos, fueron las siguientes (Tolman, 2009):

- Esquema de propagación de orden superior (ULTIMATE QUICKEST) con la técnica de promedio de Tolman (2002)
- Término de crecimiento lineal con un filtro de Cavaleri y Malanotte-Rizzoli
- Aproximación para interacciones discretas no lineales
- Formulación de la fricción de fondo de JONSWAP
- Rompiente en aguas someras de Battjes-Janssen
- Limitador de aguas someras estilo Miche, para obtener la máxima energía de las olas
- Interpolación lineal del viento en el tiempo y en el espacio
- Métodos de alivio para el efecto Garden Sprinkler (Booij y Holthuijsen, 1987, Tolman, 2002)

El modelo se desarrolló con el programa de Ardhuin et al (2010) que incluye el cálculo de flujo. Además, el modelo utiliza un esquema de propagación de tercer orden, sin amortiguación ni dispersión por el hielo marino y sin reflexión.

2.2.1.1 Descripción de la malla de cálculo del modelo

El conjunto de los modelos de oleaje consta de mallas anidadas, globales y regionales. Dichas mallas se desarrollaron con la información batimetría ETOPO-1 (Amante y Eakins, 2009), junto con la base de datos de alta resolución de la línea de costa (GSHHS, por sus siglas en inglés). Para lo cual, se crearon tres archivos para cada malla: una de batimetría, una máscara y una malla de obstrucción para la atenuación de las olas por islas no definidas (Chawla y Tolman, 2007, 2008).

Las mallas utilizadas son de tres diferentes resoluciones:

- Baja resolución de 30 minutos de arco
- Resolución media de 10 minutos de arco
- Alta resolución de 4 minutos de arco

El software de generación de cuadrículas que utilizó para desarrollar estas mallas, proporciona la flexibilidad de cerrar algunas características costeras, las cuales solo se pueden resolver en mallas de alta resolución (por ejemplo, bahías, puertos, estuarios, etc.).

Las mallas de mayor resolución se ajustaron para mejorar la eficiencia del modelo y solo proporcionan datos cerca de la costa.

2.2.1.2 Datos de entrada del modelo

Para los datos de entrada, en el modelo se utilizaron vientos globales de alta resolución a 10 m de altura del Reanálisis del Sistema de Pronóstico Climático (CFSR, por sus siglas en inglés), el cual es un reanálisis acoplado de los datos atmosféricos oceánicos, de hielo marino y terrestres. Se implementó una corrección basada en datos de altímetros para reducir el sesgo en los vientos más fuertes, especialmente sobre el Océano Austral. Los campos de viento utilizados tienen una resolución de 1/2 grado a intervalos de 1 hora.

La diferencia horaria de la temperatura aire-mar con resolución espacial de 1/2 grado, también se utilizó el modelo de la CFSR.

En lo que se refiere a las concentraciones de hielo, se obtienen a partir de la concentración de hielo marino del SMMR y SSMI, el cual utiliza un

algoritmo de alta resolución basado en el NASA Team2. Los campos de hielo utilizados son diarios con una resolución de 1/2 grado.

2.2.1.3 Modelo de salida

Del modelo Wavewatch se obtienen archivos de salida en malla con formato grib2 y resolución temporal de 3 horas, con las componentes de la intensidad del viento (U y V del viento de entrada), en m/s. El vector descrito por estas componentes muestra la dirección de donde viene el viento (convención oceanográfica).

Con la información antes mencionada, se seleccionó los eventos no tropicales (Nortes), cuya intensidad de viento fuera superior a 35 km/hr. A manera de ejemplo, en las figuras 2.7 a 2.9 se muestran tres eventos Norte, en los cuales se observa cómo evoluciona los campos de viento sobre el Golfo de México.

En el Anexo 1 “Tablas de eventos Norte”, se muestra la información de los eventos Norte ocurridos en los diferentes meses para los años de 1979 a 2019.

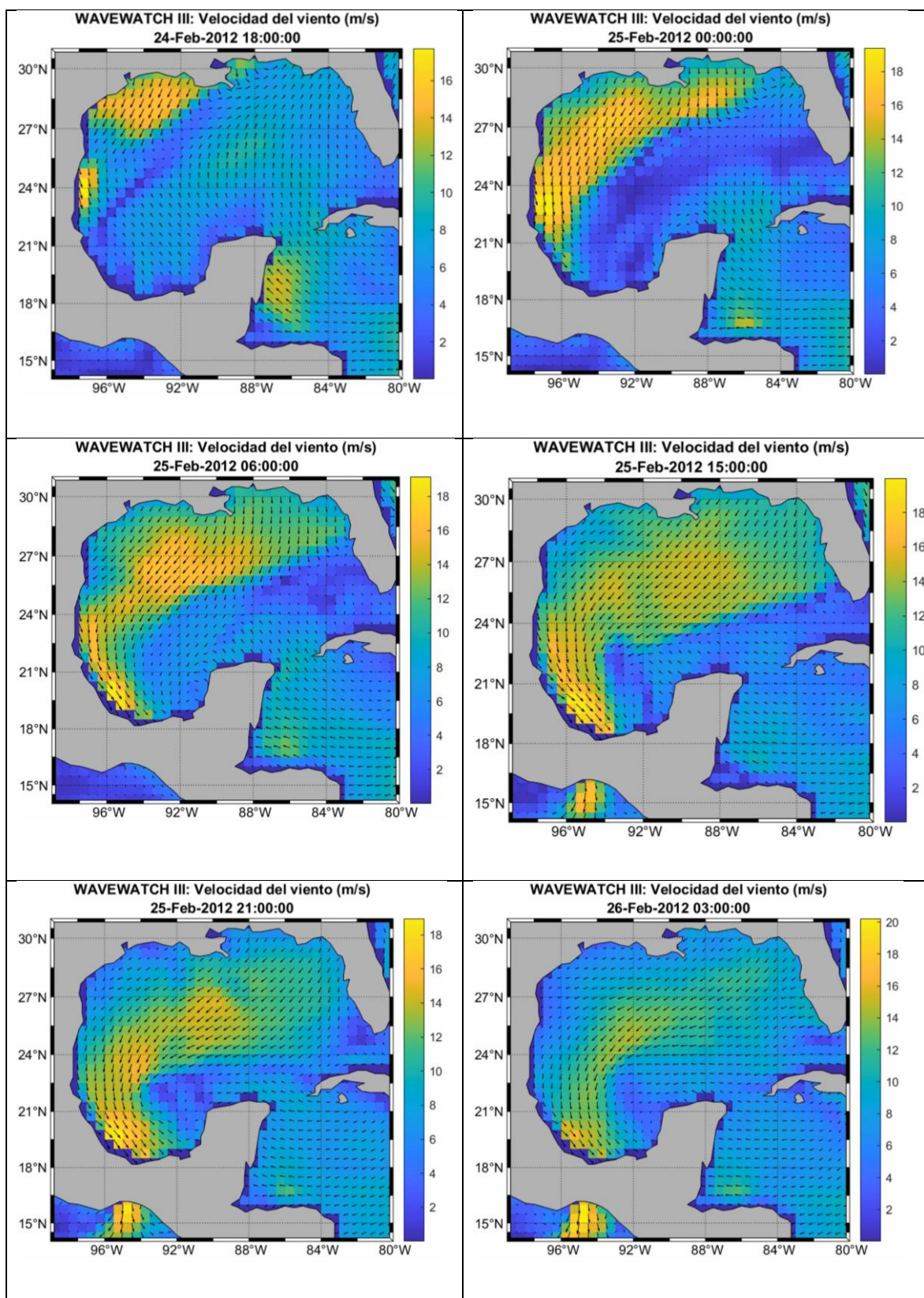


Figura 2.7 Evolución de un evento Norte en febrero de 2012

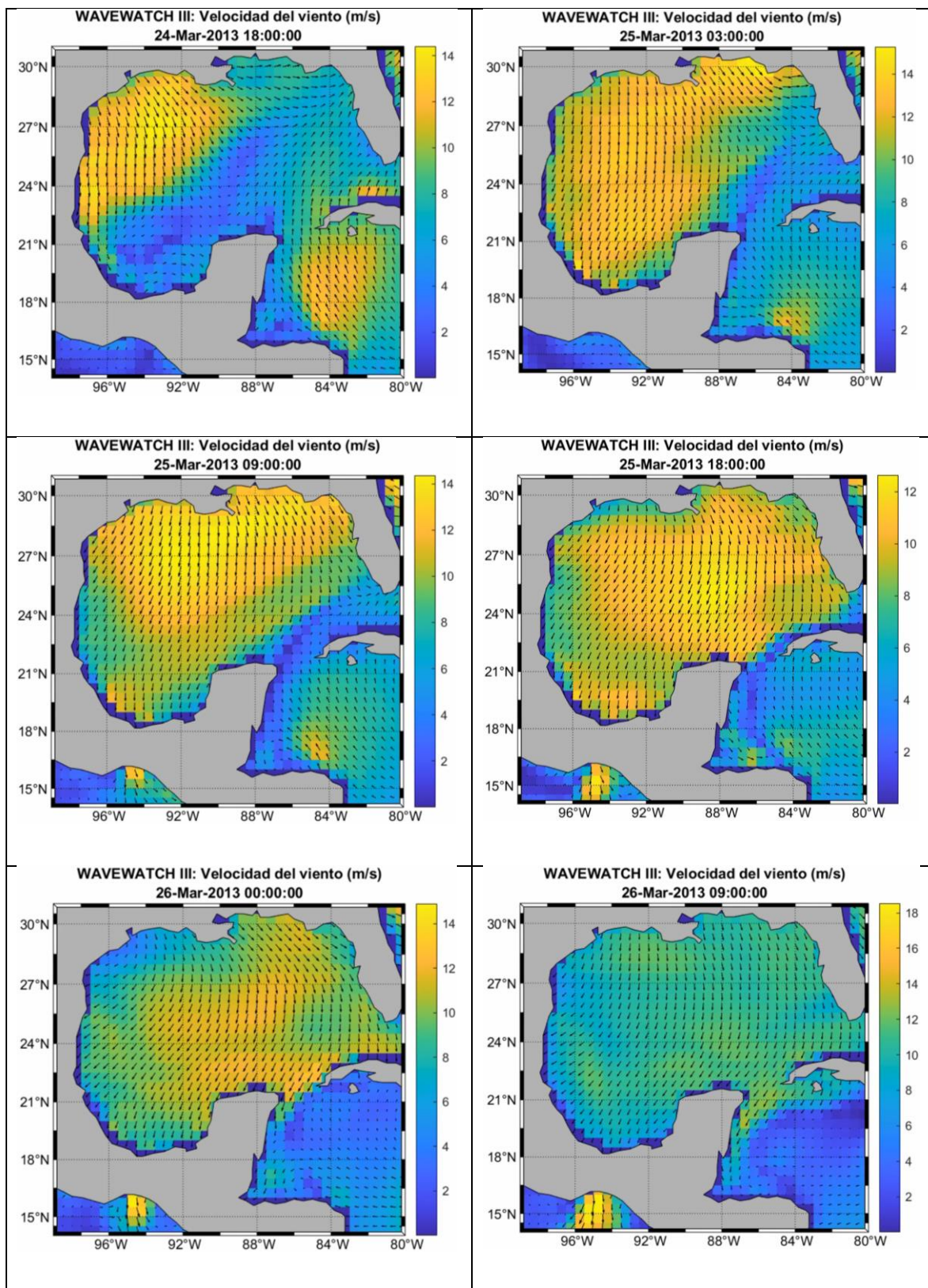


Figura 2.8 Evolución de un evento Norte en marzo de 2013

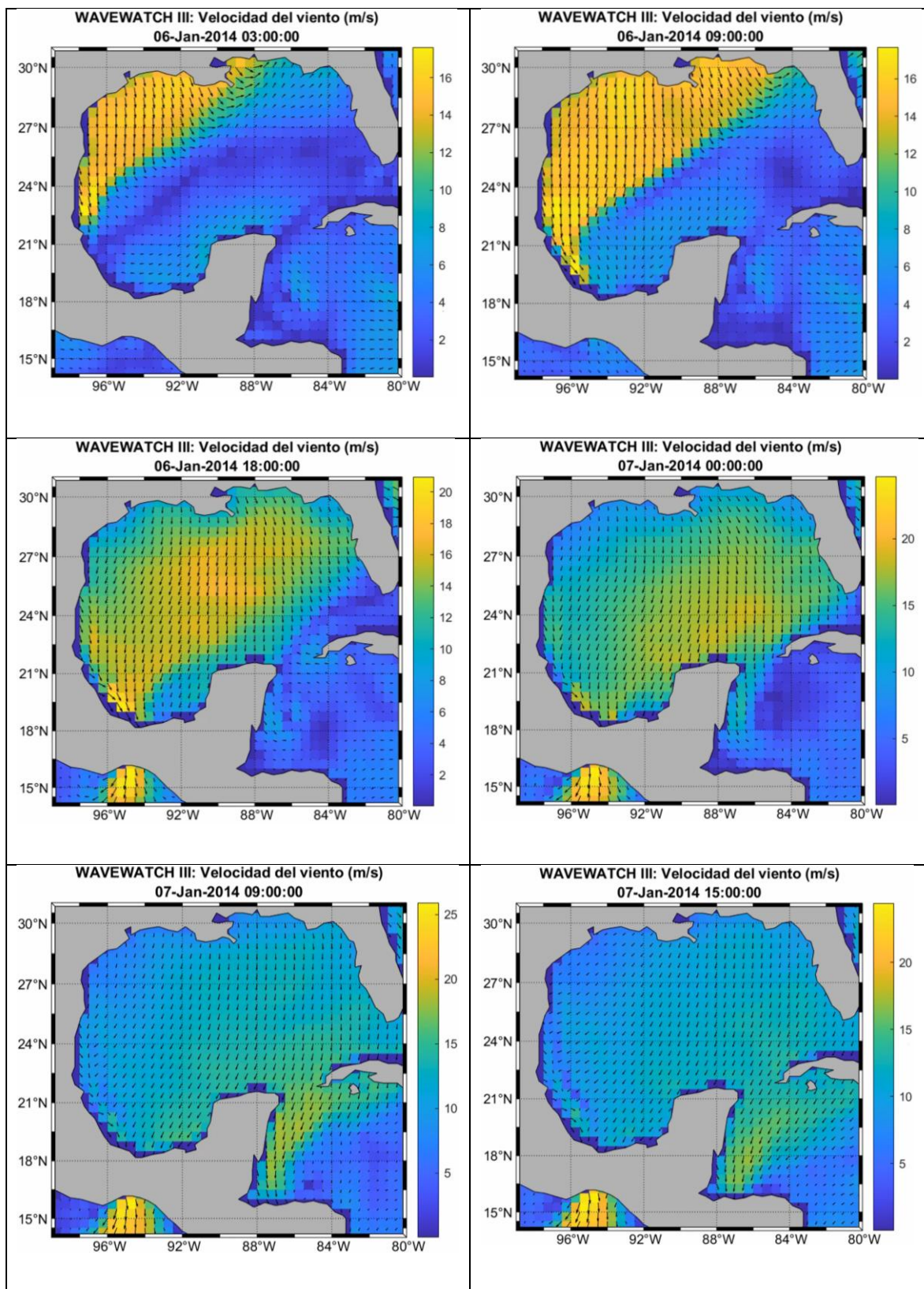


Figura 2.9 Evolución de un evento Norte en enero de 2014

3. Modelaciones numéricas

3.1 Modelo numérico

Para determinar el oleaje producido por los eventos no tropicales (Nortes), se implementó un modelo numérico espectral del oleaje de tercera generación, forzado a partir de los campos de viento generados por cada uno de dichos eventos.

El cálculo de la generación y propagación del oleaje se realizó con el modelo Spectral Waves (SW) del software MIKE 21, dicho modelo es desarrollado por el Danish Hydraulic Institute, el cual simula el crecimiento, transformación y decaimiento del oleaje generado por viento, y cuyas principales características son:

- Crecimiento del oleaje debido a la acción del viento
- Interacción no lineal entre olas
- Disipación debido al descrestamiento (whitecapping)
- Disipación debido a la fricción de fondo
- Disipación por vegetación
- Disipación por lodo
- Disipación por asomeramiento (induce la rotura del oleaje)
- Refracción y difracción debido a variaciones batimétricas
- Interacción oleaje – corriente

Este modelo incluye dos tipos de formulaciones, la formulación paramétrica direccionalmente desacoplada y una formulación totalmente espectral.

La formulación paramétrica direccionalmente desacoplada se basa en una parametrización de la ecuación de conservación del oleaje, de acuerdo con Holthuijsen (1989), dicha parametrización se realiza en el dominio de la frecuencia y toma como variables dependientes el momento cero y el primer momento del espectro del oleaje.

El modelo totalmente espectral se basa en la ecuación de conservación del oleaje descrita por Komen et al. (1994) y Young (1999), donde la frecuencia – dirección del espectro del oleaje es la variable dependiente.

La discretización de las ecuaciones del modelo numérico, se realiza con el método de volúmenes finitos centrado en la celda, tanto para el espacio geográfico como el espectral. La integración en el tiempo se basa en una aproximación de paso fraccional y se desarrolló con un esquema de secuencia múltiple explícito para la propagación de la acción del oleaje.

El modelo MIKE 21 SW está formulado en términos de la dirección del oleaje θ , la frecuencia angular relativa σ , donde la densidad de acción $N(\sigma, \theta)$, está relacionada con la densidad de la energía $E(\sigma, \theta)$, por medio de:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

En aplicaciones a gran escala, la ecuación de balance de la acción del oleaje se formula en coordenadas esféricas, donde la evolución del espectro del oleaje en una posición, está dada por su latitud ϕ , longitud λ , en un instante t , y compuesta de la siguiente forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi} c_{\phi} N + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{\theta} N = \frac{S}{\sigma}$$

donde la fuente de energía S , representa una sobreposición de distintas funciones fuente que describen los múltiples fenómenos físicos descritos por:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{veg} + S_{mud} + S_{surf}$$

Donde:

S_{in}	Energía del viento transferida de manera lineal y no lineal, de acuerdo a Janssen (1989, 1991) y Janssen et al. (1989)
S_{nl}	Interacciones no lineales ola-ola definidas por Hasselmann & Hasselmann (1985) y Hasselmann et al. (1985)
S_{ds}	Disipación de la energía debido al descrestamiento (whitecapping) descrito en Komen et al. (1994)
S_{bot}	Disipación de la energía por fricción de fondo descrita por Johnson & Kofoed-Hansen (2000)
S_{bot}	Disipación de la energía debida a la vegetación descrita por Suzuki et al (2012) y Jacobsen et al (2019)
S_{mud}	Disipación de la energía debida Al amortiguamiento del oleaje por presencia de lodo, descrita por Kranenburg et al (2011)

S_{surf} Disipación de la energía por rotura descrita por Battjes & Janssen (1978) y Eldeberkly & Battjes (1996).

3.2 Malla de cálculo

Para la implementación del modelo numérico, se definió una malla de cálculo, mediante el método de mallas flexibles no estructuradas con elementos triangulares, dicho método permite la distribución óptima de los nodos de cálculo, en el cual, se adapta la resolución de las celdas a las características físicas del lugar y a las zonas de interés dentro del modelo numérico, lo que permite focalizar la mayor resolución a la zona de estudio y el resto del dominio con un espaciamiento amplio, y con ello se optimiza el rendimiento computacional.

De acuerdo con lo anterior, la malla de cálculo quedó constituida por celdas triangulares de tamaño variable que van de una resolución gruesa (aproximadamente 10 km entre nodo) hasta una resolución más fina (500 m entre nodos) para la zona próxima al litoral mexicano.

La malla de cálculo resultante, tiene 110,451 celdas triangulares, las cuales cubren un área aproximada de 1'958,020 km², la cual abarcó todo el Golfo de México y parte del Mar Caribe. (ver figura 3.1).

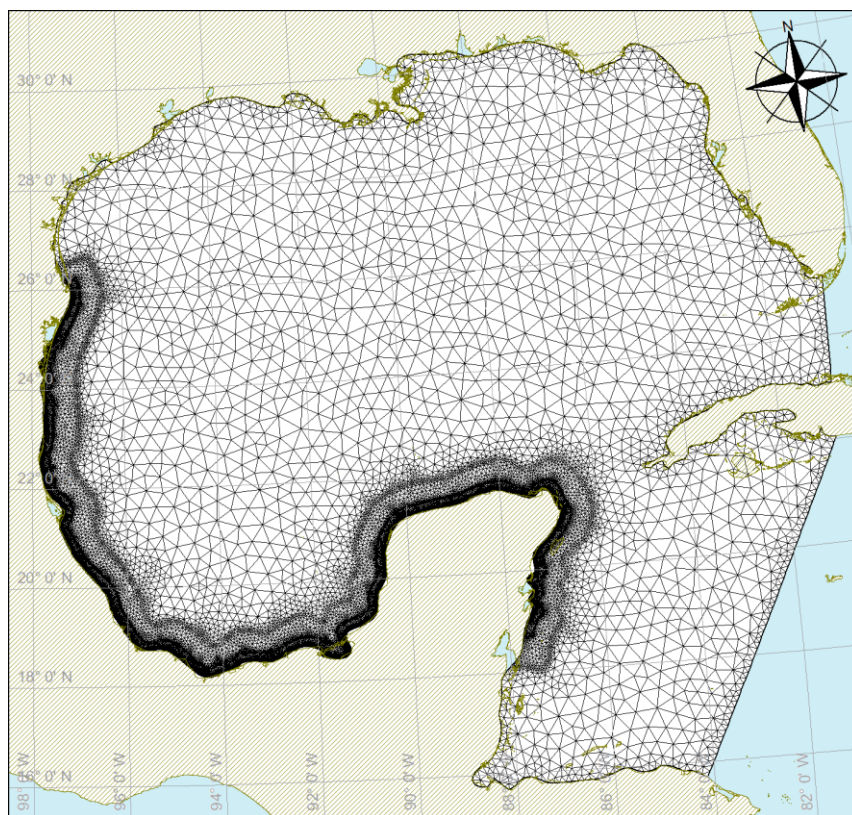


Figura 3.1 Definición de la malla de cálculo

Una vez definida la malla de cálculo, se realizó la incorporación de la información de profundidades de las diferentes fuentes de información descritas en el capítulo 2, y en la figura 3.2 se muestra la malla con información batimétrica en todo el Golfo de México y Mar Caribe.

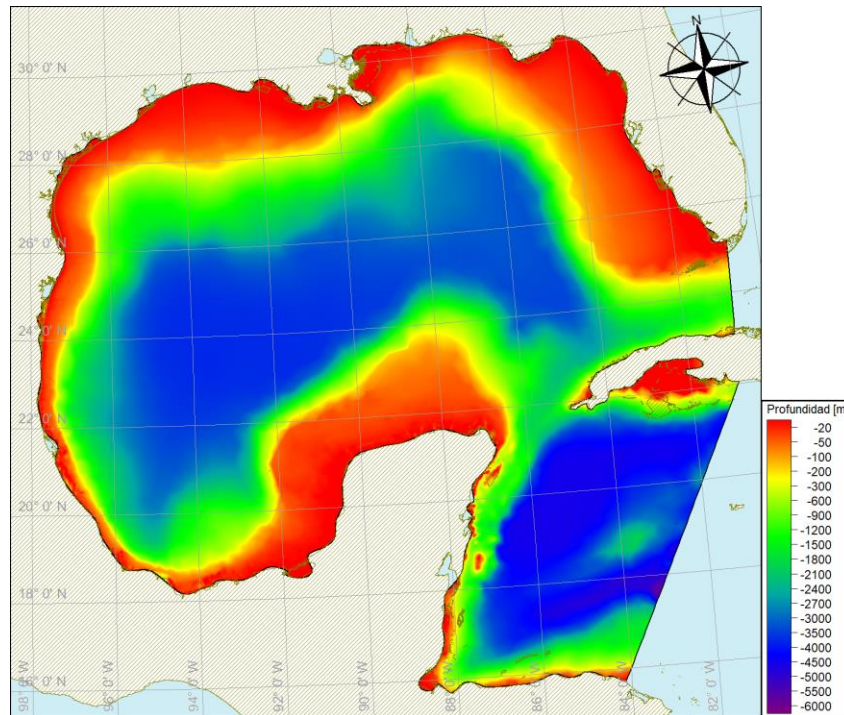


Figura 3.2 Malla de cálculo con profundidades

3.3 Calibración del modelo numérico

Para llevar a cabo la calibración del modelo numérico, se utilizó la información de uno de los eventos “Norte” que afectó considerablemente las costas del estado de Veracruz, el cual fue registrado el 12 de noviembre de 2019, dicho evento generó vientos fuertes en el Golfo de México de aproximadamente de 70 km/hr.

Para conocer el comportamiento de dicho oleaje es necesario conocer varios aspectos, uno de ellos son las características de oleaje en un punto de medición, así mismo, es necesario obtener información del campo de viento en el área de cálculo y finalmente, se requiere conocer las condiciones batimétricas. La información antes mencionada se utilizó para realizar modelaciones numéricas para una zona definida de cálculo (ver figura 3.2).

3.3.1 Oleaje

Para conocer el comportamiento del evento Norte, se obtuvo información registrada de la Red de Estaciones Oceanográficas de México (RENEOM), el cual es un proyecto que tiene como objetivo medir, analizar, interpretar y difundir información océano meteorológica, y es monitoreada desde el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), quien apoya al Sector Transporte Marítimo Nacional en el conocimiento de las condiciones océano meteorológicas en los puertos de los litorales mexicanos.

La RENEOM cuenta con varias estaciones que miden las características del oleaje (altura y periodo de oleaje, dirección de incidencia y temperatura del agua), y para tal efecto, el IMT utiliza boyas direccionales medidoras de oleaje. Estos equipos son una herramienta muy utilizada alrededor del mundo para la medición del oleaje direccional; cuentan con un sistema de transmisión de datos que envía información en tiempo real a la estación receptora, lo que permite contar con una buena información del comportamiento del mar en todo momento.

Para el caso de estudio, se utilizó una boya que se encuentra ubicada en la zona exterior del puerto, en la parte norte de la bahía de Vergara, la ubicación de la estación se muestra en la figura 3.3.

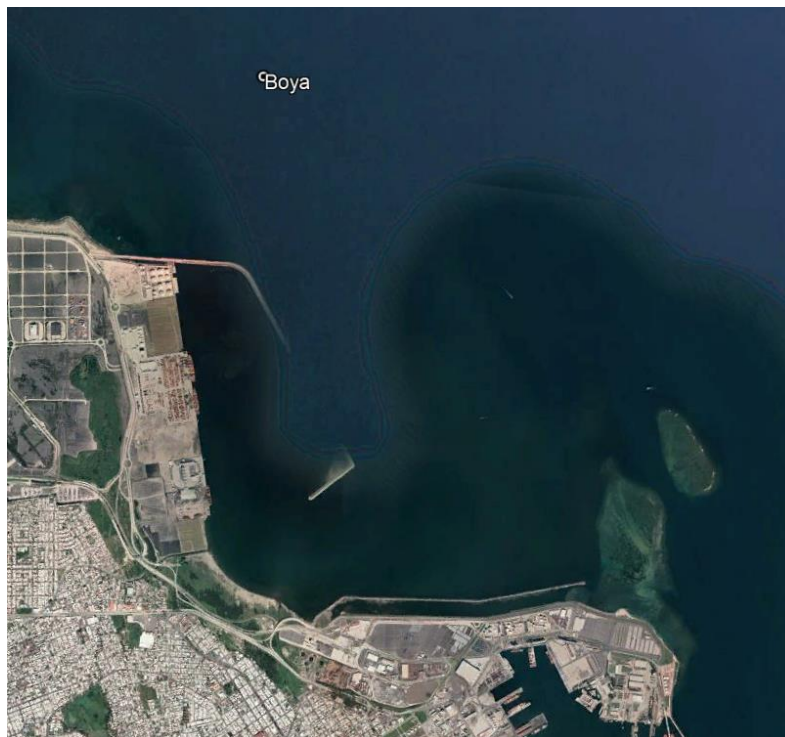


Figura 3.3 Ubicación de la boya

De la información registrada por la boya medidora de oleaje, se seleccionó la serie de tiempo del 11 al 17 de noviembre de 2019. Para este caso se tomó en cuenta la información del oleaje máximo, dichos datos se muestran en la figura 3.4.

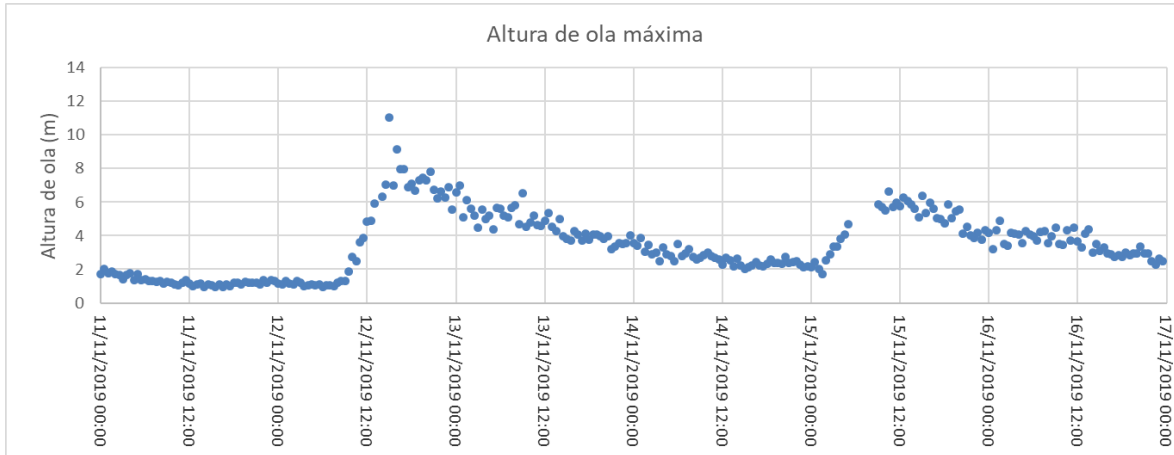


Figura 3.4 Comportamiento del oleaje máximo registrado por la boya

Como se puede observar en la figura 3.4, a principios del medio día del 11 de noviembre, el oleaje máximo se encontraba a aproximadamente a 1 m., y el 12 de noviembre, a inicios del medio día, el oleaje máximo incremento hasta llegar a una altura de ola máxima de casi 11 m.

Para llevar a cabo la calibración del modelo, se realizaron varias simulaciones, las cuales tomaron en cuenta las variables que ayudan a calibrar dichos modelos. En la figura 3.5, muestra algunos de los principales resultados que proporcionaron un mejor ajuste a los valores medidos.

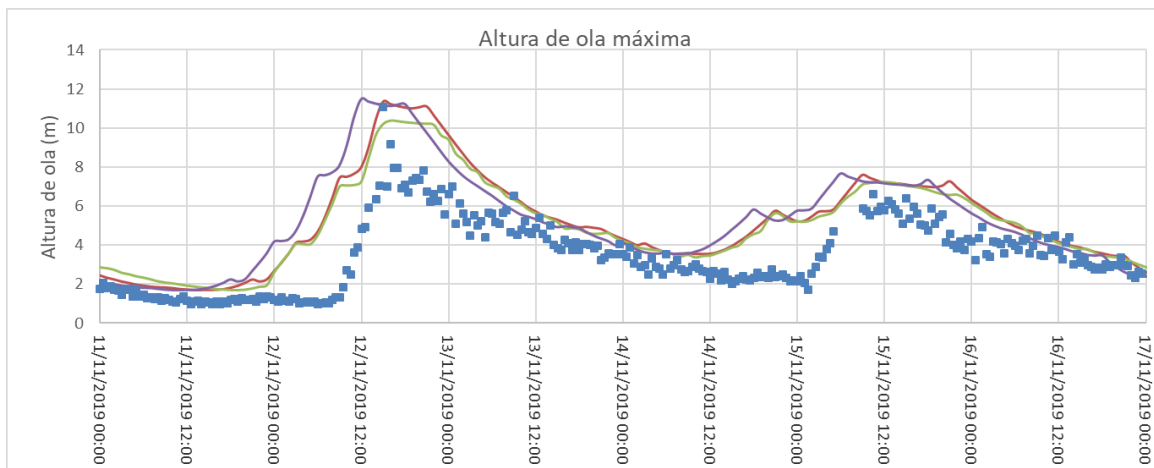


Figura 3.5 Resultados con diferentes valores de calibración del modelo

En los resultados obtenidos en la figura 3.5, se seleccionó la gráfica que se ajustó a los datos medidos, dicha gráfica se muestra en la figura 3.6.

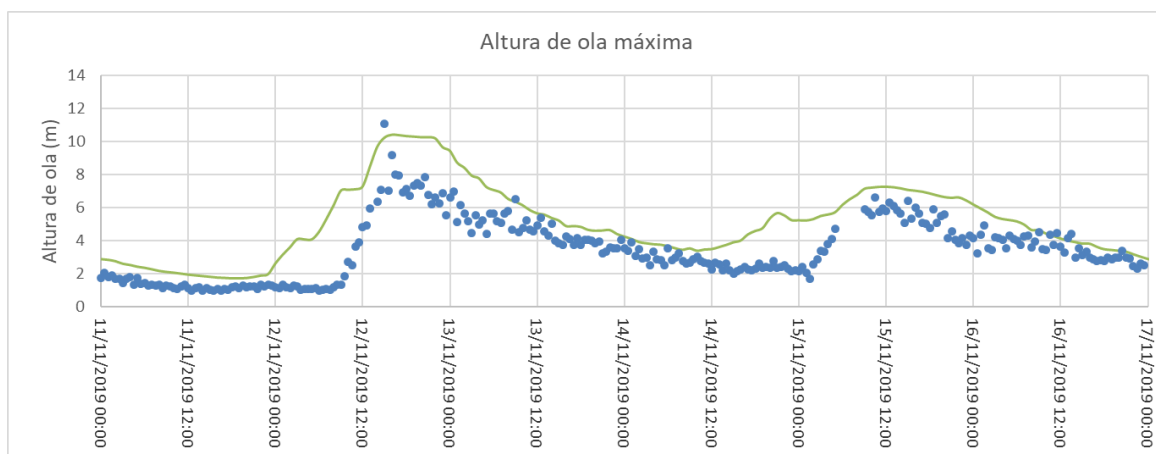


Figura 3.6 Calibración del modelo numérico con la altura máxima

Una vez calibrado el modelo numérico, se realizaron 664 modelaciones numéricas de generación y propagación de oleaje para diferentes eventos no tropicales que ocurrieron en el Golfo de México desde 1979 a 2019, la cantidad de eventos que se presentaron en las fechas antes mencionadas se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Eventos Norte ocurridos desde 1979 a 2019

Año	Eventos	Año	Eventos
1979	20	2000	16
1980	20	2001	16
1981	24	2002	16
1982	23	2003	13
1983	15	2004	11
1984	16	2005	11
1985	15	2006	19
1986	15	2007	14
1987	14	2008	19
1988	20	2009	18
1989	18	2010	15
1990	17	2011	21
1991	12	2012	14
1992	12	2013	24
1993	13	2014	22
1994	14	2015	13
1995	14	2016	17
1996	20	2017	17
1997	15	2018	17
1998	12	2019	7
1999	15		
		Total	664

En las figuras 3.7 y 3.8, se muestran dos ejemplos de los resultados obtenidos de las modelaciones numéricas, en las cuales se observa el cambio de la propagación del oleaje a través del tiempo en todo el Golfo de México.

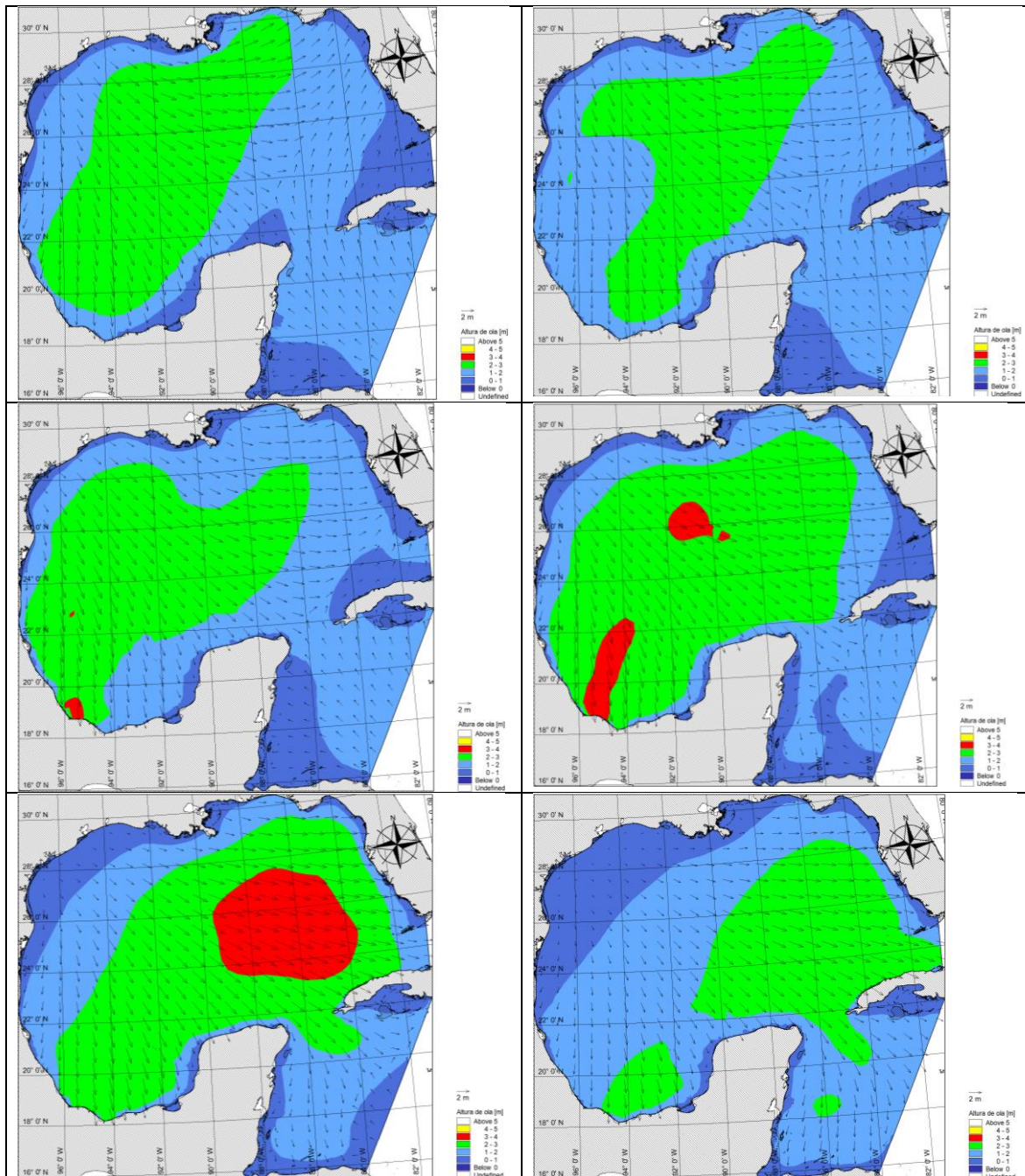


Figura 3.7 Ejemplo de propagación de oleaje producido por un evento Norte de fecha del 2 de enero a las 20:00 hrs al 4 de enero a las 6:00 hrs de 1996

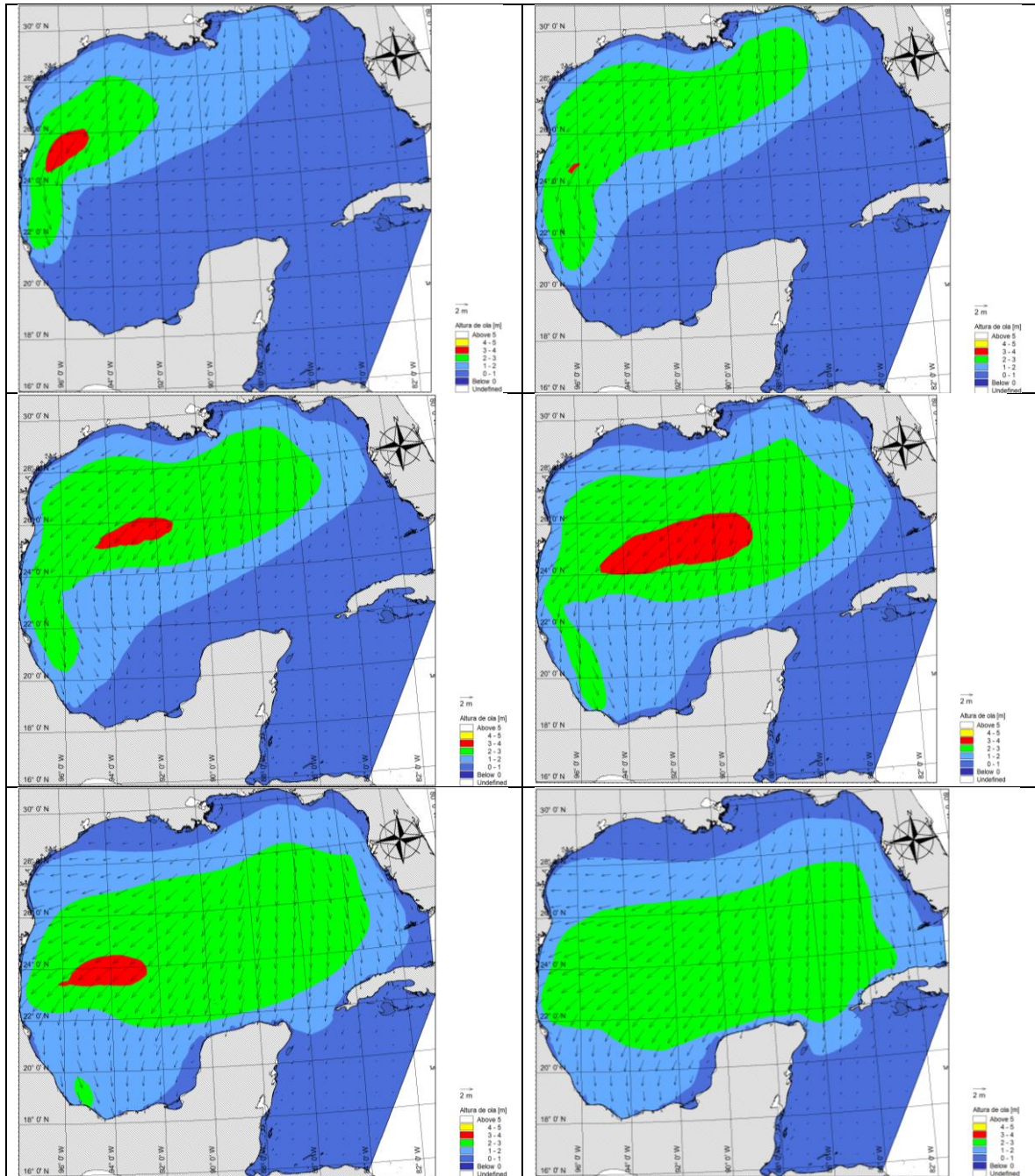


Figura 3.8 Ejemplo de propagación de oleaje producido por un evento Norte de fecha del 22 de octubre a las 18:00 hrs al 24 de octubre a las 12:00 hrs de 2006

3.4 Análisis extremal

Para determinar los mapas del oleaje para eventos extremos no tropicales (Nortes), asociado a diferentes períodos de retorno, se utilizaron los resultados de las modelaciones numéricas, para lo cual se obtuvieron los valores de las máximas alturas de ola generadas por cada uno de los eventos extremos en cada celda del dominio de cálculo. Para cada celda de cálculo (110,451 celdas) se generaron series con 664 datos de alturas de ola máxima y para cada serie, se determinó, mediante un análisis de extremos, la altura de ola para diferentes períodos de retorno.

Para ello se define cualquier altura de ola (que pertenecen al muestreo estadístico) en términos de probabilidad, es decir, la probabilidad que existe de que cierto valor de altura de ola sea mayor a una altura de ola determinada, para un conjunto de datos registrados en un cierto tiempo, por lo que, resulta necesario conocer el modelo de distribución probabilístico que mejor represente a la muestra estadística.

Para el análisis de extremos, se consideraron 5 funciones de distribución de probabilidad Exponencial, Gumbel o Fisher Tippet I, Weibull, Frechet o Fisher Tippet II y Rayleigh, las cuales se indican a continuación.

3.4.1 Distribución Exponencial

La distribución Exponencial representa el tiempo continuo equivalente a la distribución geométrica y al tiempo de espera para la ocurrencia de un proceso que es continuo en el tiempo y de intensidad constante.

La función para determinar la densidad de probabilidad se define como

$$F = P(X \leq x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)}$$

Donde:

x Altura de ola.

A Parámetro de escala.

B Parámetro de posición.

3.4.2 Distribución Gumbel

La distribución Fisher-Tippet Tipo 1, es una distribución de valores extremos, también conocida como Distribución Gumbel, que fue desarrollada por el matemático alemán Emil Julius Gumbel.

La función para determinar la densidad de probabilidad se define como:

$$F = P(X \leq x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)}}$$

3.4.3 Distribución Weibull

La distribución Weibull se trata de un modelo continuo, utilizado ampliamente para determinar la vida útil de componentes, determinar el tiempo hasta que un mecanismo falla o para definir periodos de retorno.

La función para determinar la densidad de probabilidad se define como:

$$F = P(X \leq x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k}$$

Donde:

k Parámetro de forma.

3.4.4 Distribución Frechet

La distribución Fisher-Tippett Tipo 2, también conocida como Distribución Frechet, que proviene del nombre del matemático francés Maurice Frechet, es un caso especial de la distribución de valores extremos.

La función para determinar la densidad de probabilidad se define como:

$$F = P(X \leq x) = e^{-\left(1 + \frac{x-B}{kA}\right)^{-k}}$$

3.4.5 Distribución Rayleigh

La distribución Rayleigh es una función de distribución continua, se suele presentar cuando un vector bidimensional tiene sus dos componentes ortogonales, independientes y siguen una distribución normal.

La función para determinar la densidad de probabilidad se define como:

$$F = P(X \leq x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^2}$$

3.4.6 Ajuste por mínimos cuadrados ortogonales

Para cada una de las 110,451 series se realizó el ajuste por mínimos cuadrados, para lo cual, los valores de las alturas de ola se ordenaron de forma descendente y se le asignó a cada ola (x_i) una probabilidad de no excedencia (F_i) en función del orden (m) de cada valor, mediante la siguiente expresión:

$$F_i = 1 - \frac{m - \alpha}{N_T + \beta} \quad \text{donde } m = 1, 2, 3, \dots, N$$

Los valores de las constantes α y β para cada una de las funciones de distribución de probabilidad vienen dadas por:

Exponencial	$\alpha = \text{---}$	$\beta = 1$
Weibull	$\alpha = 0.20 + 0.27/\sqrt{k}$	$\beta = 0.20 + 0.23/\sqrt{k}$
Gumbel (FT-I)	$\alpha = 0.44$	$\beta = 0.12$
Frechet (FT-II)	$\alpha = 0.44 + 0.52/k$	$\beta = 0.12 - 0.11/k$
Rayleigh	$\alpha = 0.5$	$\beta = \text{---}$

Las funciones de distribución se describieron en la forma $X = AY + B$, para aplicar el método de mínimos cuadrados y obtener los valores de los parámetros de escala y de posición de cada una de dichas funciones, por lo que, primeramente, se obtuvo el valor de la variable reducida Y , cuya expresión se indica a continuación:

Exponencial	$Y = -\ln(1 - F)$
Weibull	$Y = [-\ln(1 - F)]^{1/k}$
Gumbel (FT-I)	$Y = -\ln[-\ln(F)]$
Frechet (FT-II)	$Y = k\{[-\ln(F)]^{-1/k} - 1\}$
Rayleigh	$Y = [-\ln(1 - F)]^{1/2}$

Para el caso de las distribuciones Gumbel, Exponencial y Rayleigh (las cuales tienen dos parámetros) pueden ser analizadas por el método de los mínimos cuadrados directamente. Las distribuciones Frechet y Weibull tienen tres parámetros, por lo tanto, tienen que ser modificadas en una forma de funciones de dos parámetros, se fijó para ello el parámetro de forma (k). La razón principal para fijar el parámetro k es la dificultad de predecir la verdadera matriz de distribución de una muestra de tamaño pequeño. Goda (1988) demostró esta dificultad al recomendar que se fijara el parámetro k en uno de los siguientes valores para estas distribuciones:

- Weibull ($k = 0.75; 1.0; 1.4; 2.0$) y
- Frechet ($k = 2.5; 3.3; 5.0; 10.0$).

Los coeficientes de la regresión A y B de las funciones de distribución se obtuvieron con las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{Cov(Y, X)}{Var(Y)} \quad B = \bar{X} - A\bar{Y}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

$$Var(Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2 \quad Cov(Y, X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})(x_i - \bar{X})$$

Si consideramos que el periodo de retorno (T_r) puede expresarse como:

$$T_r = \frac{1}{\lambda(1 - F(x))}$$

Las ecuaciones de distribución para obtener las alturas de ola (x^T) asociada a cierto periodo de retorno (T_r) quedan definidas como sigue:

$$\text{Exponencial} \quad x^T = A \left(-\ln \left(\frac{1}{\lambda T_r} \right) \right) + B$$

$$\text{Weibull} \quad x^T = A \left(-\ln \left(\frac{1}{\lambda T_r} \right)^{1/k} \right) + B$$

$$\text{Gumbel (FT-I)} \quad x^T = A \left(-\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right) \right) \right) + B$$

$$\text{Frechet (FT-II)} \quad x^T = A \left\{ k \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right)^{-1/k} \right] - 1 \right\} + B$$

$$\text{Rayleigh} \quad x^T = A \left(-\ln \left(\frac{1}{\lambda T_r} \right)^{1/2} \right) + B$$

Donde λ es la densidad de muestreo, definida como la razón entre el número de eventos de tormenta y el número de años del periodo de información.

Con las funciones de distribución de probabilidad antes mencionadas (exponencial, Gumbel, Rayleigh, Weibull y Frechet), se definieron mapas de las alturas de ola, las cuales fueron generadas por eventos extremos no tropicales, y desarrolladas para diferentes periodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100 años), dichos mapas se muestran en las figuras 3.9 a la 3.19.

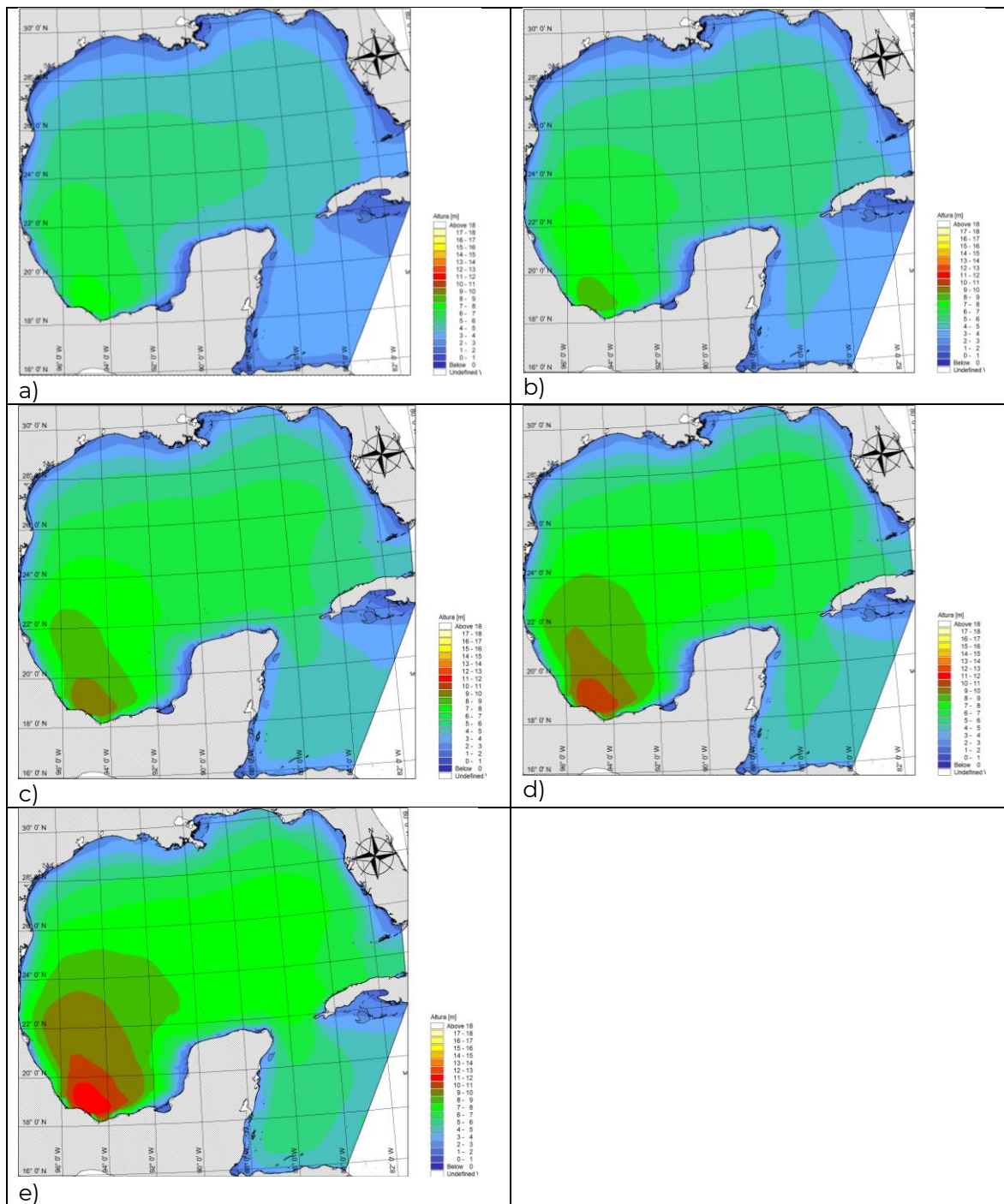


Figura 3.9 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución exponencial a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

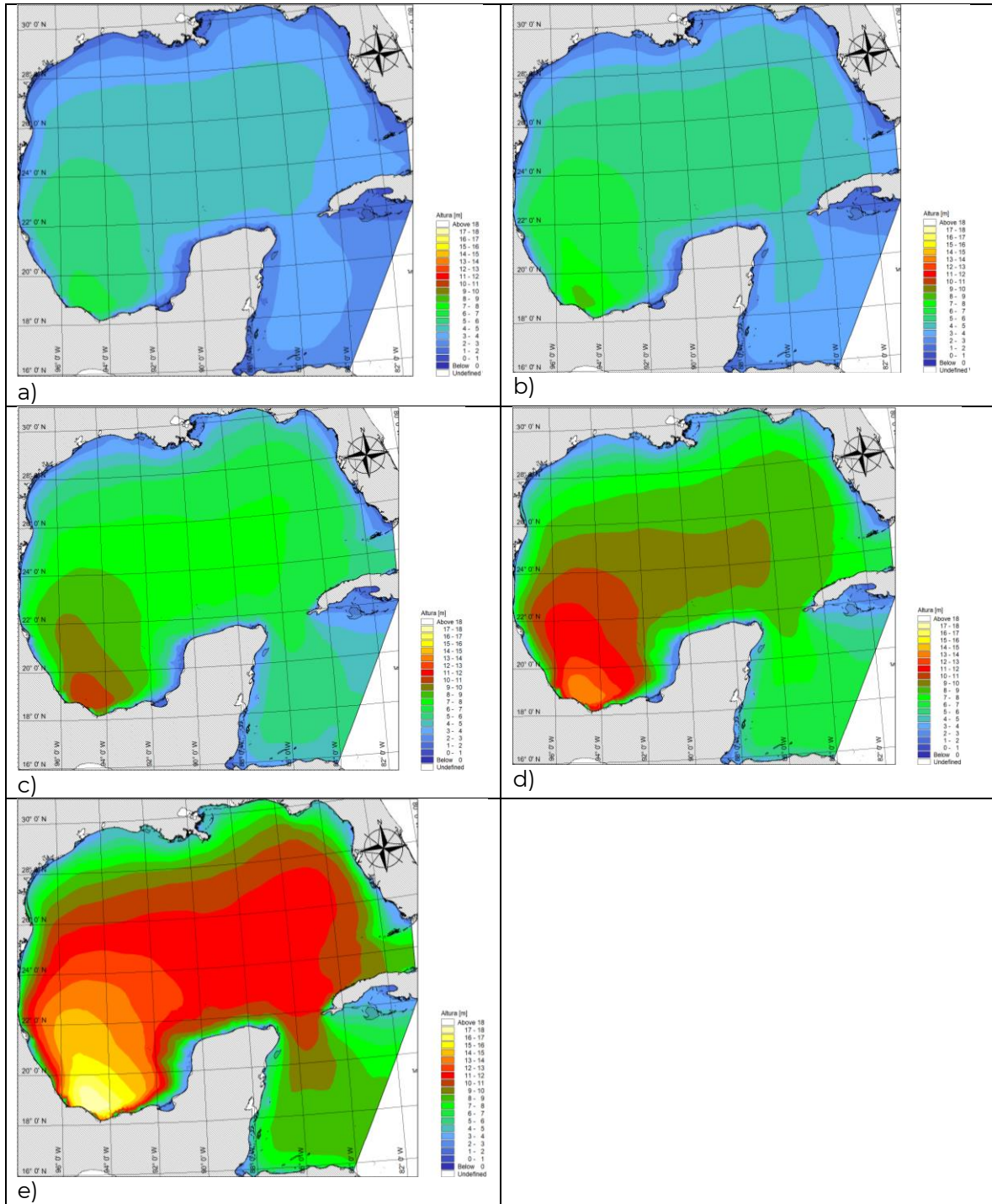


Figura 3.10 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=2.5$ a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

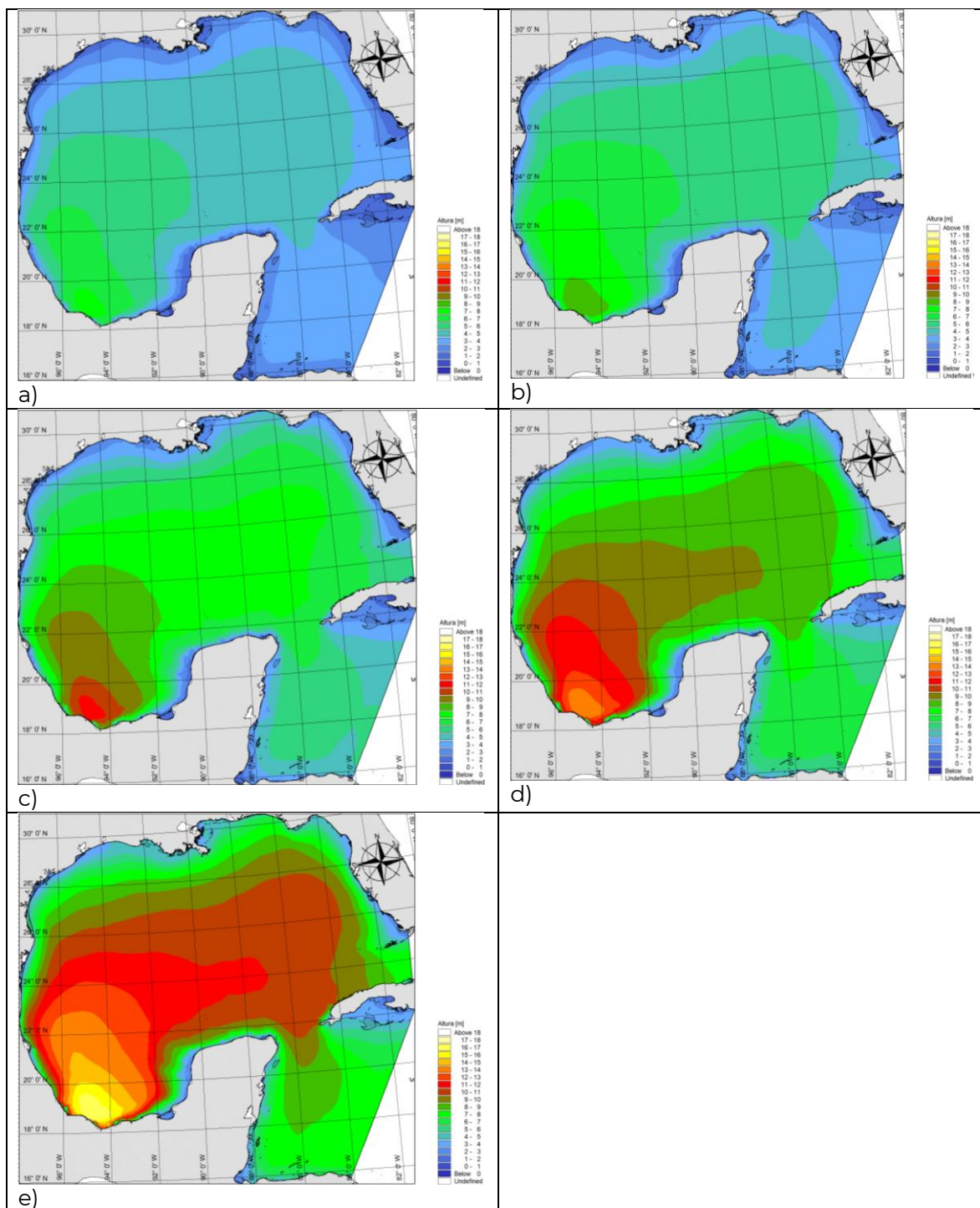


Figura 3.11 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=3.3$ a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

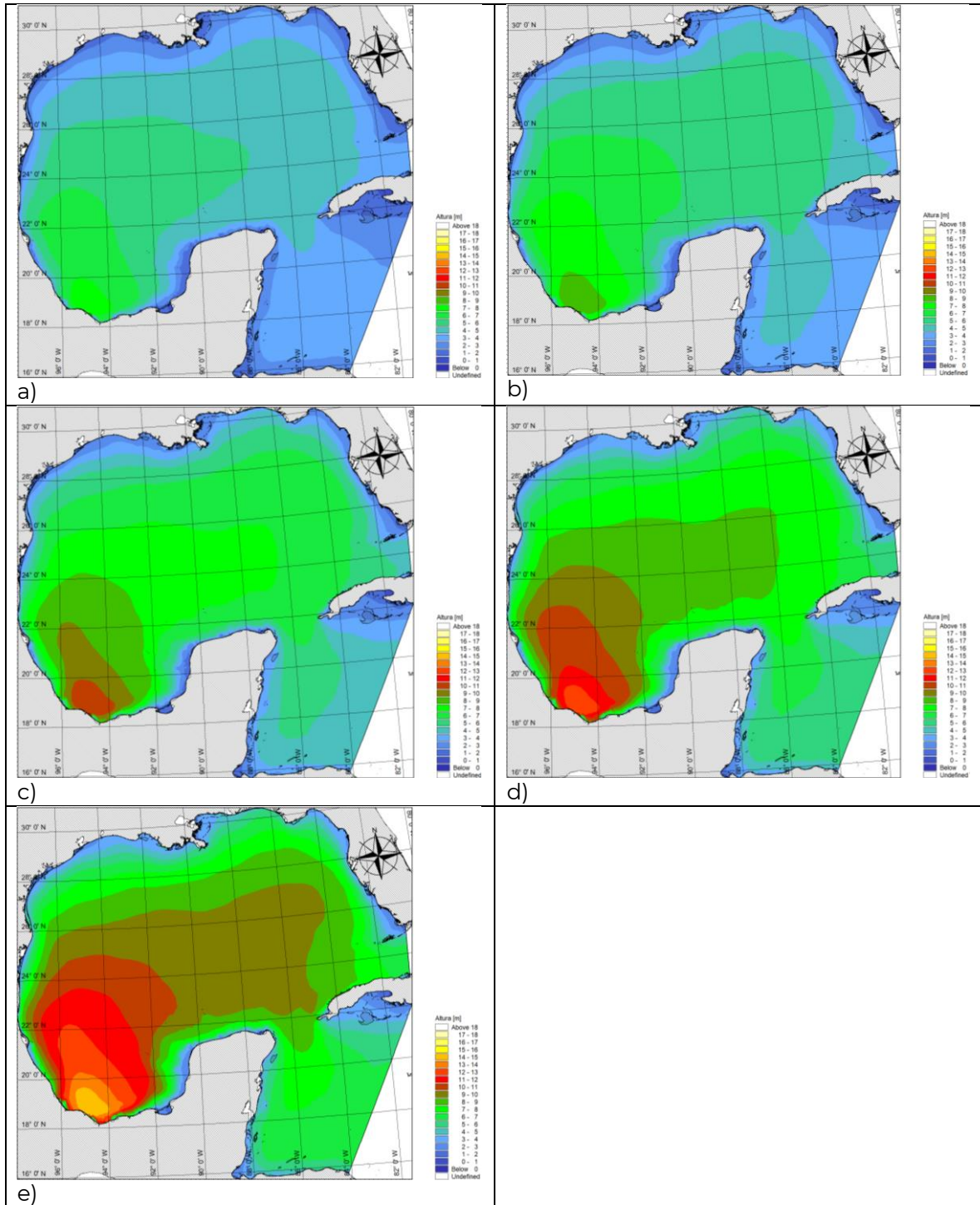


Figura 3.12 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=5.0$ a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

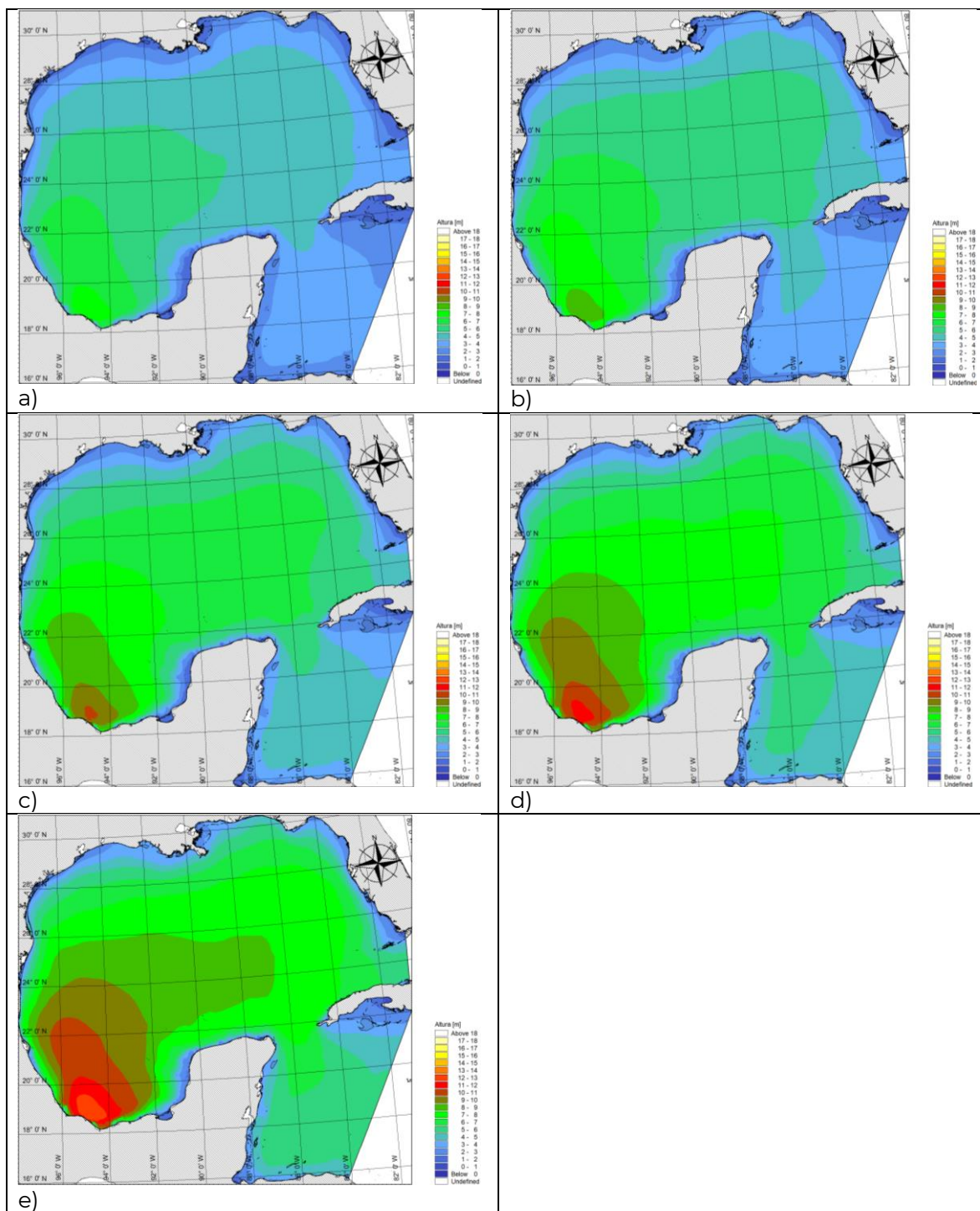


Figura 3.13 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=10.0$ a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

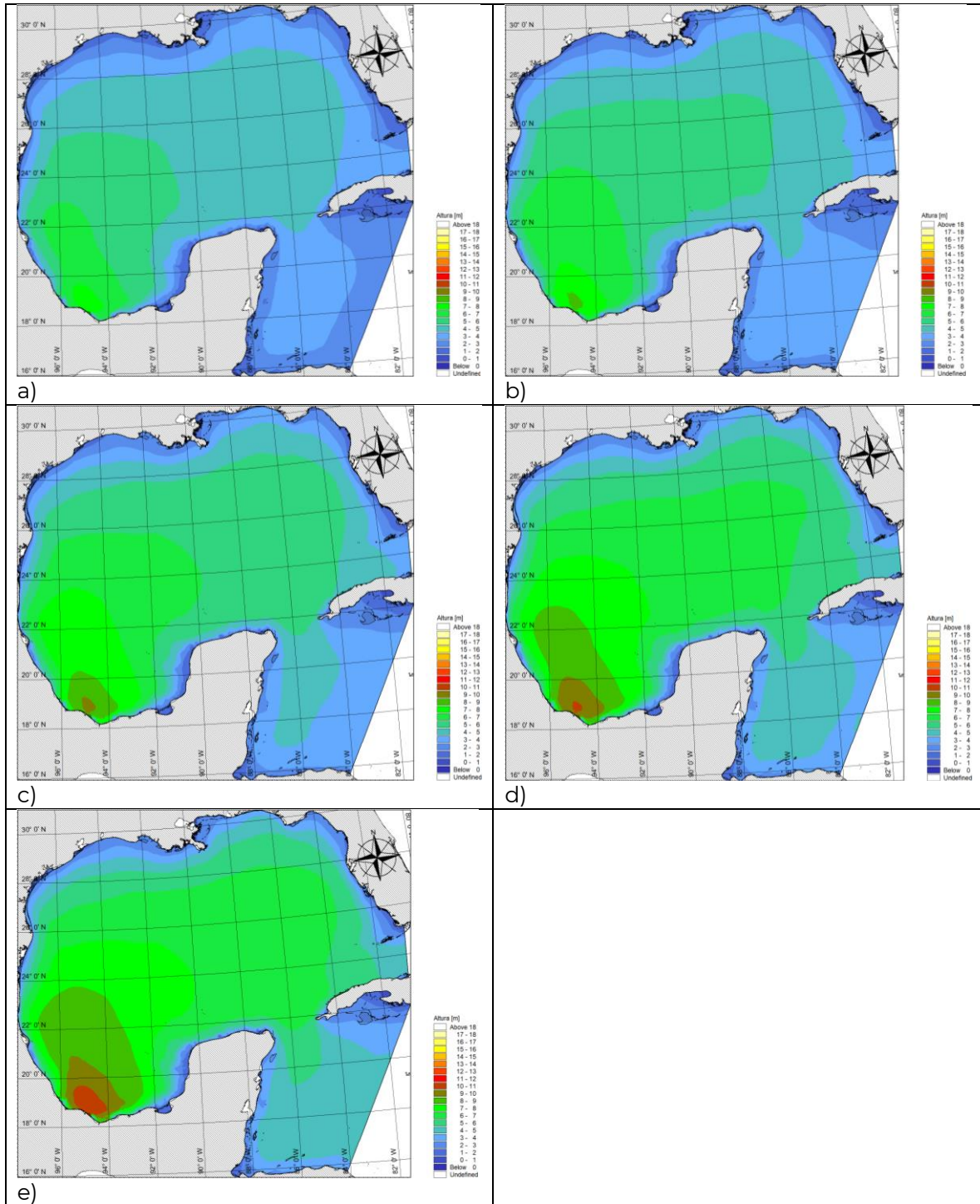


Figura 3.14 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Gumbel a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

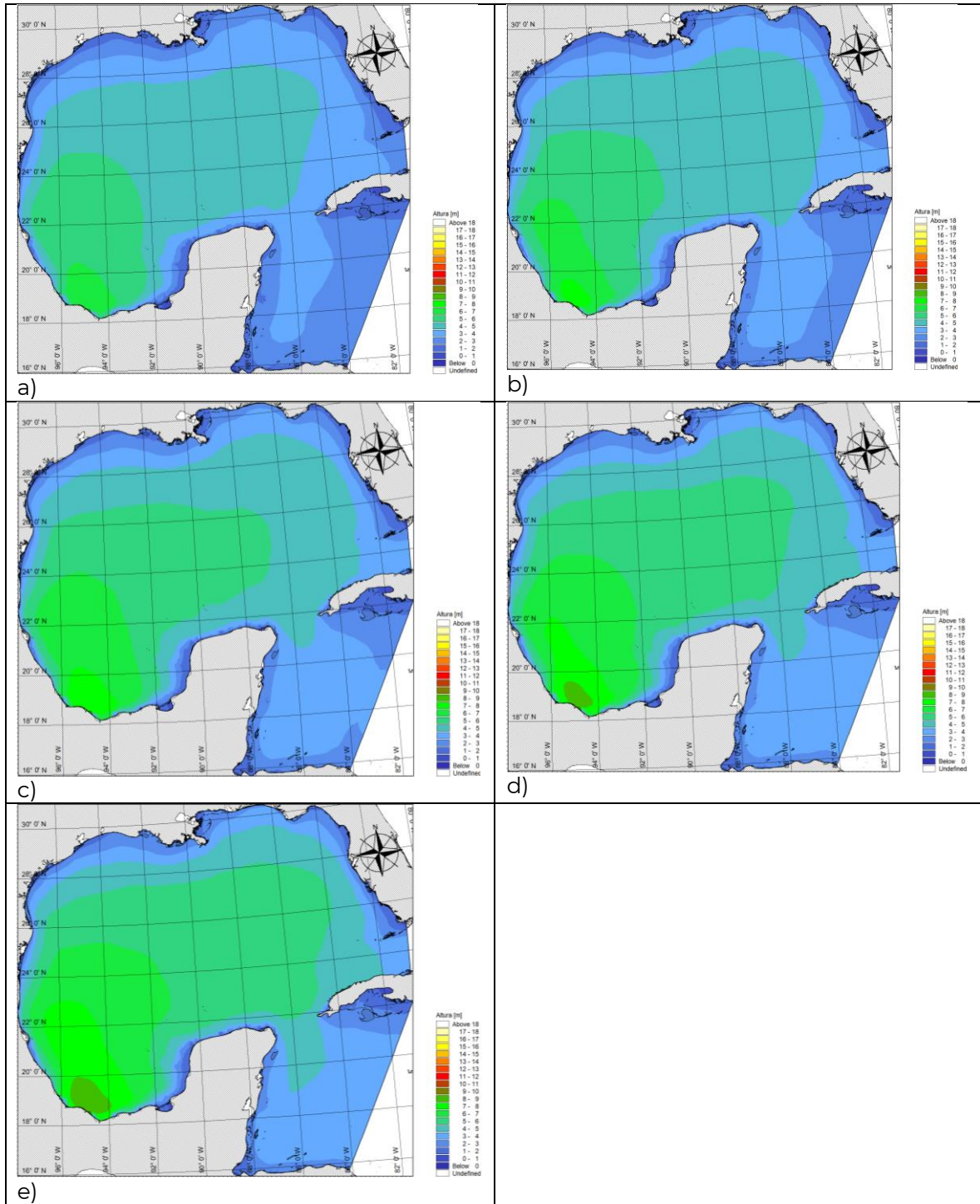


Figura 3.15 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Rayleigh a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

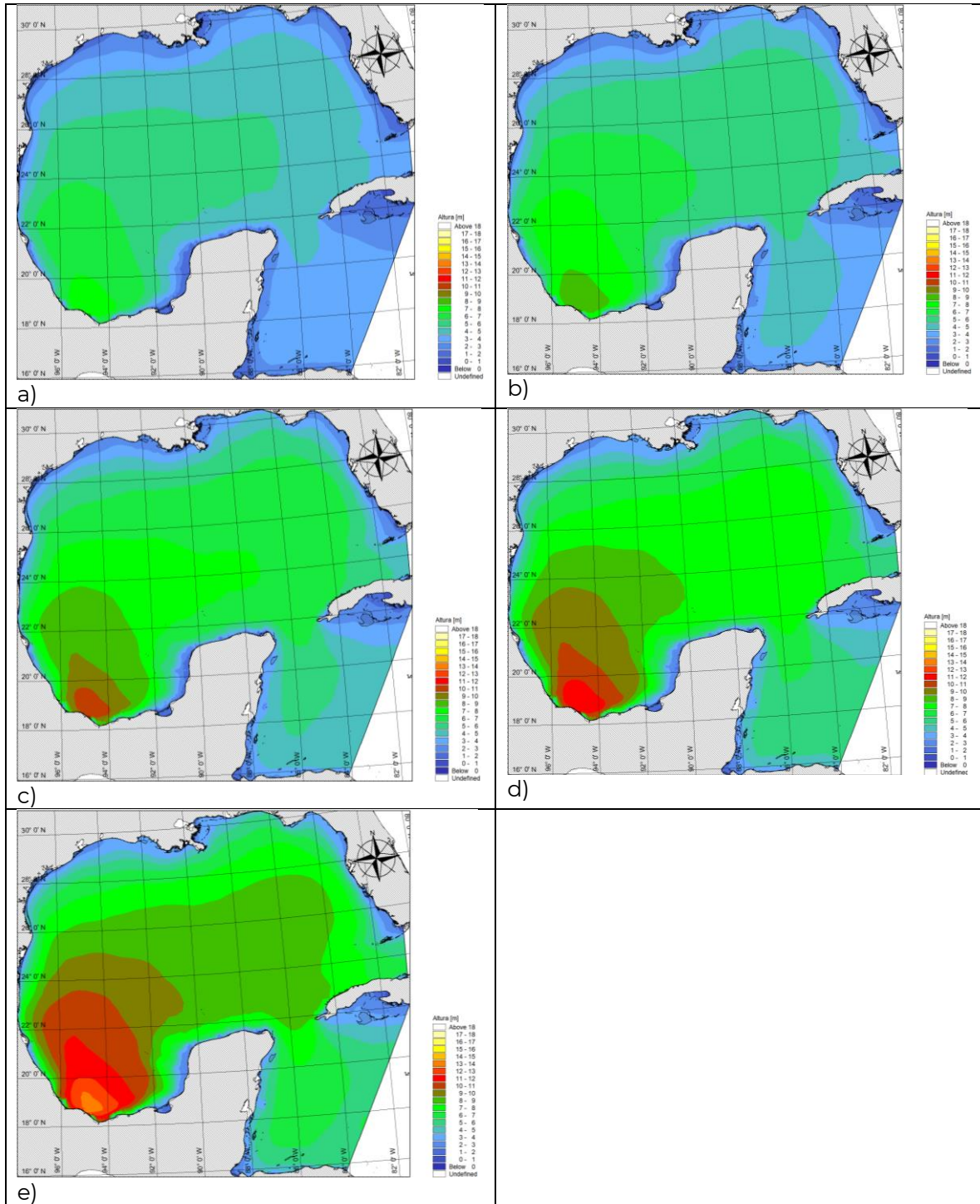


Figura 3.16 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Weibull con $k = 0.75$ a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

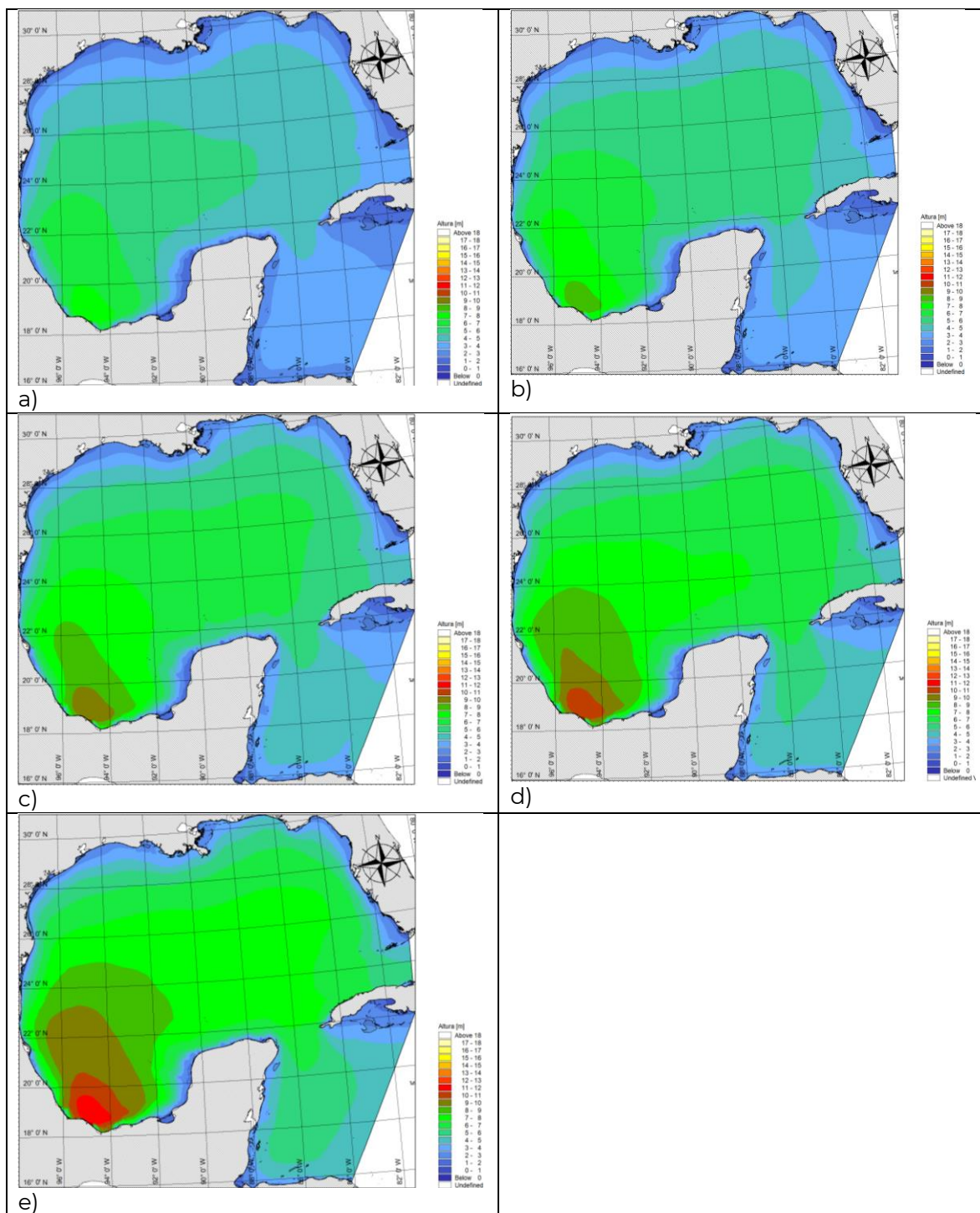


Figura 3.17 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Weibull con $k = 1.0$ a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

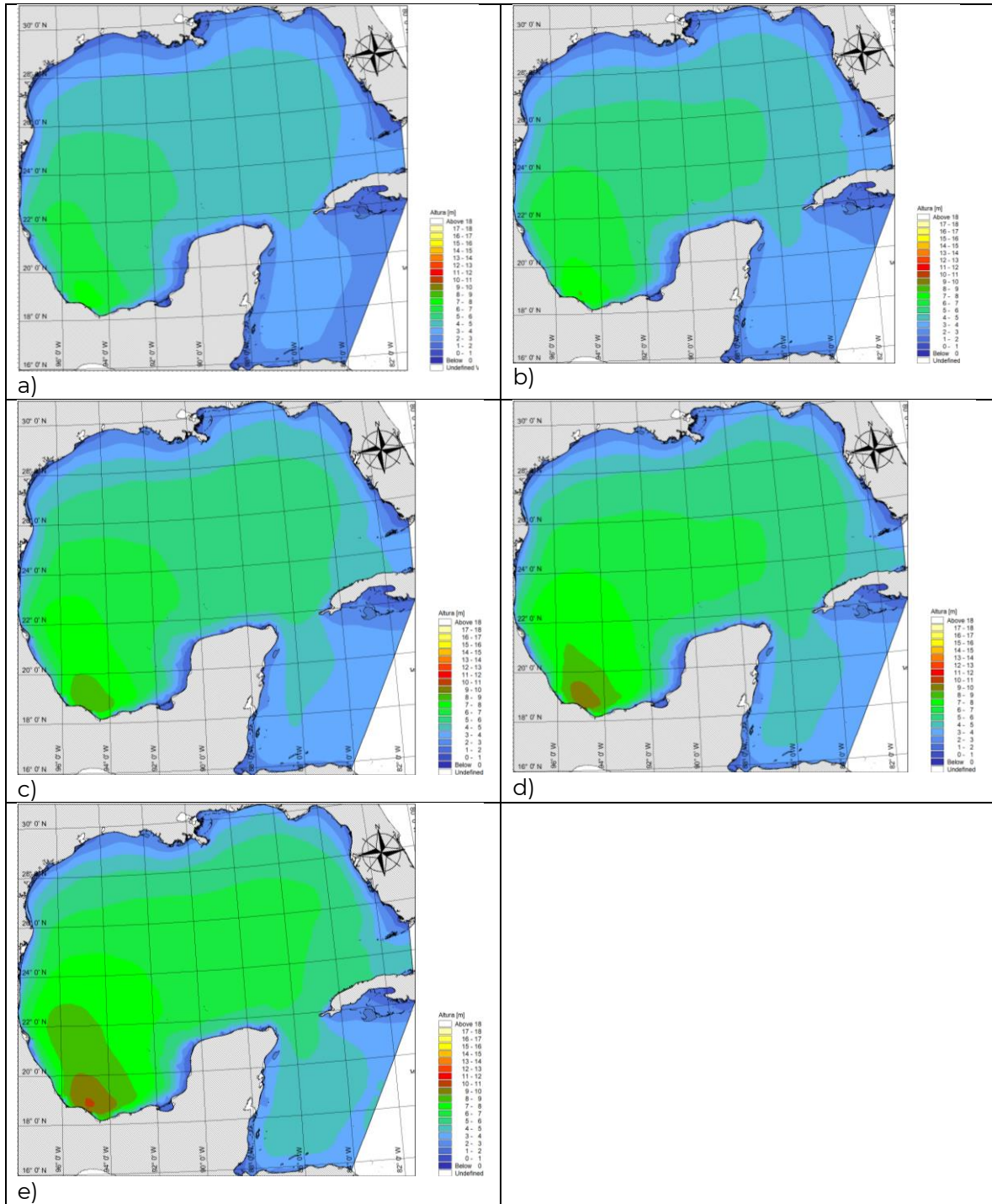


Figura 3.18 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Weibull con $k = 1.4$ a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

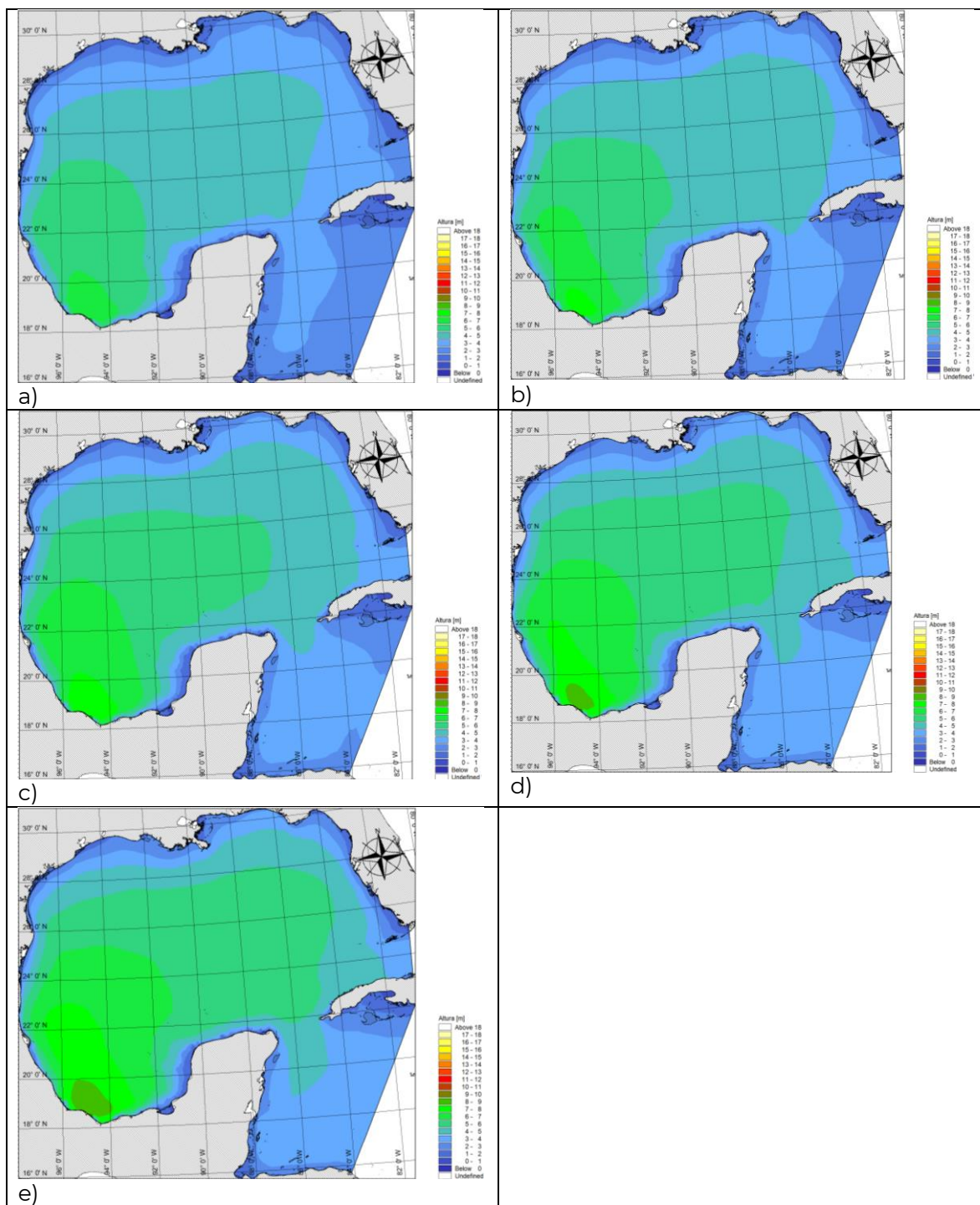


Figura 3.19 Mapas de altura de ola asociados a diferentes períodos de retorno para la distribución Weibull con $k = 2.0$ a) $Tr = 5$ años, b) $Tr = 10$ años, c) $Tr = 25$ años, d) $Tr = 50$ años y e) $Tr = 100$ años

Como se puede observar en las figuras 3.9 a la 3.19, el oleaje debido a los eventos extremos no tropicales impacta, principalmente, al estado de Veracruz y de ahí, con menor rango, a los estados de Tamaulipas y Campeche, con alturas de ola que van de los 8 a los 14 m para un período de retorno de 50 años.

Dichos impactos afectan a las playas, puertos y a las zonas costeras de cada uno de los estados.

4. Análisis e interpretación de los resultados

Con los resultados obtenidos de las modelaciones numéricas, se calculó el coeficiente de correlación lineal (ρ) para cada una de las distribuciones de probabilidad (exponencial, Gumbel, Rayleigh, Weibull y Frechet), y así obtener una función de distribución con la mejor aproximación a alturas de ola.

La función de correlación para el oleaje es una herramienta utilizada en el análisis de datos oceánicos, y con ello, cuantificar la relación entre dos series de datos de oleaje. La función de correlación calcula la similitud y la dependencia lineal entre las dos series.

La correlación se basa en el coeficiente de correlación de Pearson, el cual varía entre -1 y 1. Un valor de 1 indica una correlación perfecta y positiva, mientras que un valor de -1 indica una correlación perfecta y negativa. Un valor de 0 indica que no existe correlación entre las dos series. Para determinar la correlación se calculó con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}}$$

Donde:

- X es el valor de oleaje calculado con el modelo numérico para cada uno de los eventos Norte.
- Y es el valor de oleaje ajustado por cada una de las funciones de distribución de probabilidad.

Con objeto de elegir la distribución de probabilidad con el mejor ajuste, del análisis de extremos, se obtuvieron los coeficientes de correlación en todo el dominio de cálculo, los cuales se indican en los mapas de las figuras 4.1 a la 4.10.

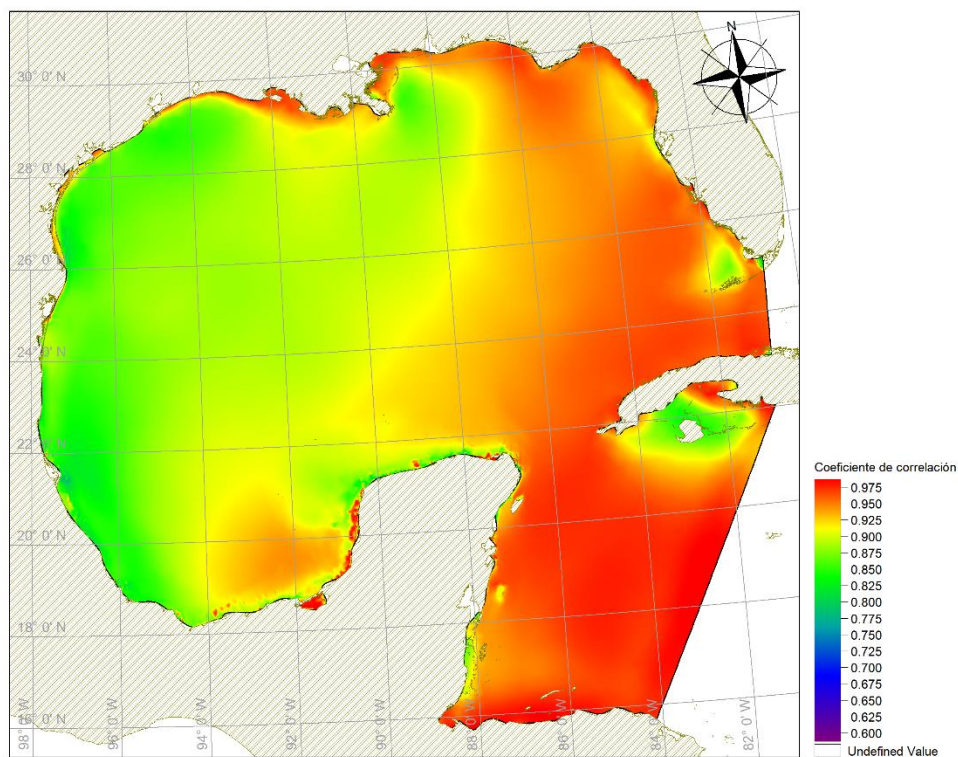


Figura 4.1 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad exponencial

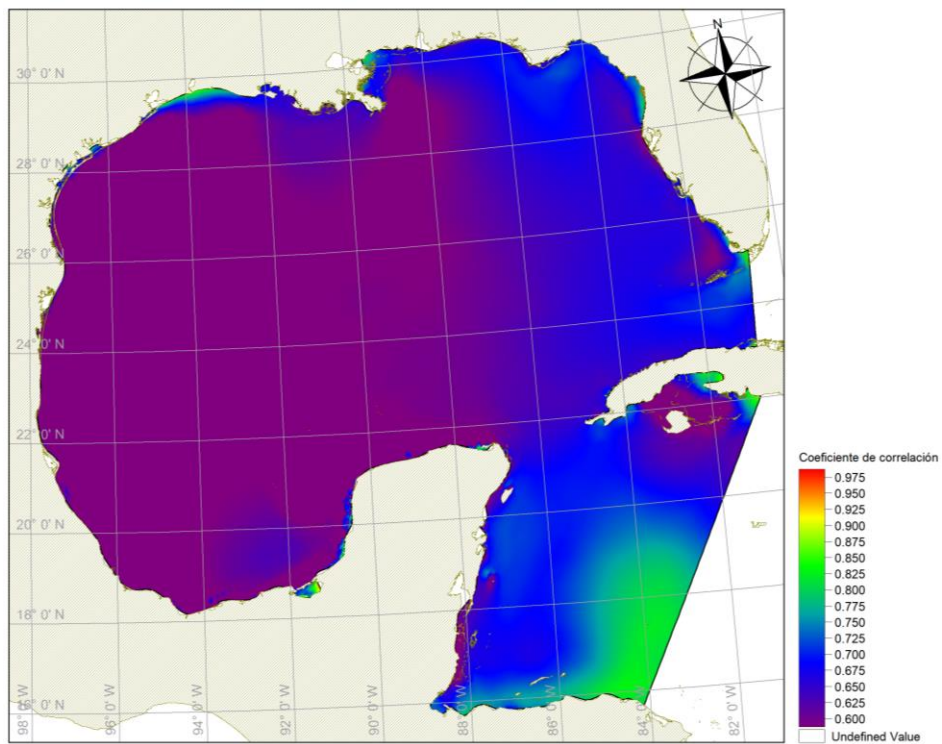


Figura 4.2 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad de Frechet con un valor de $k=2.5$

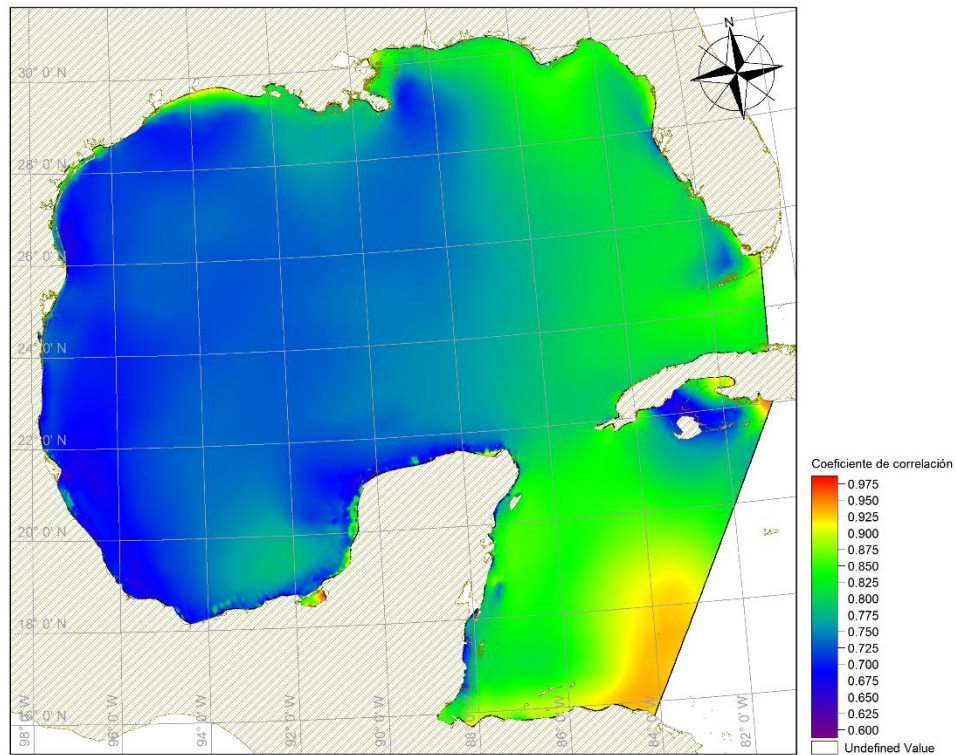


Figura 4.3 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad de Frechet con un valor de $k=3.3$

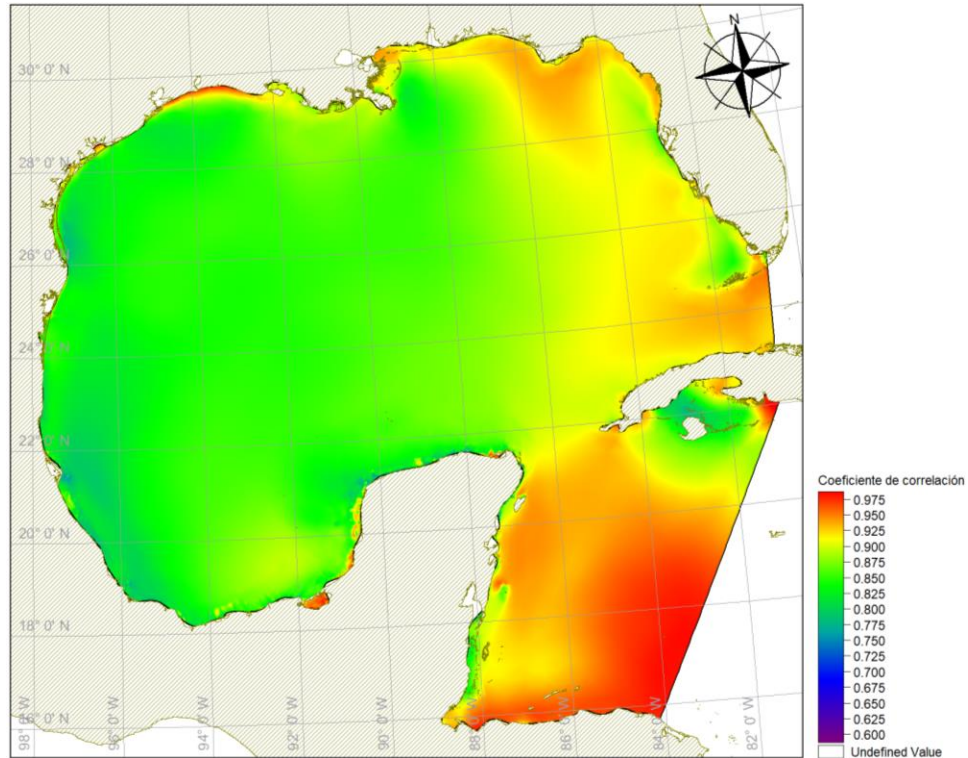


Figura 4.4 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad de Frechet con un valor de $k=5.0$

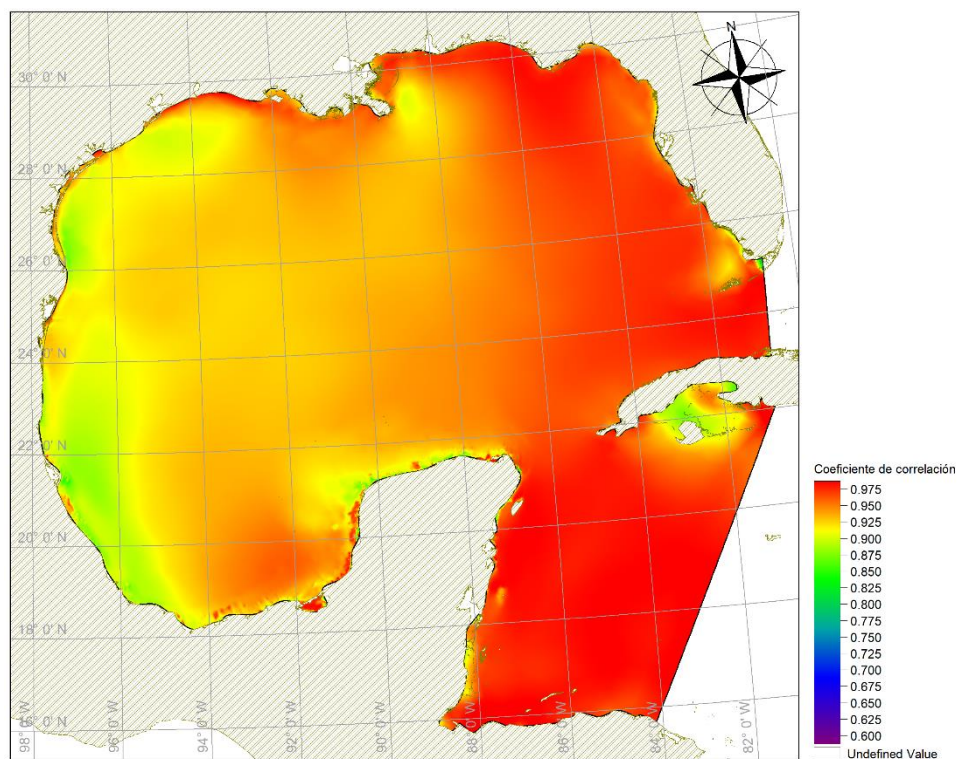


Figura 4.5 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad de Frechet con un valor de $k= 10.0$

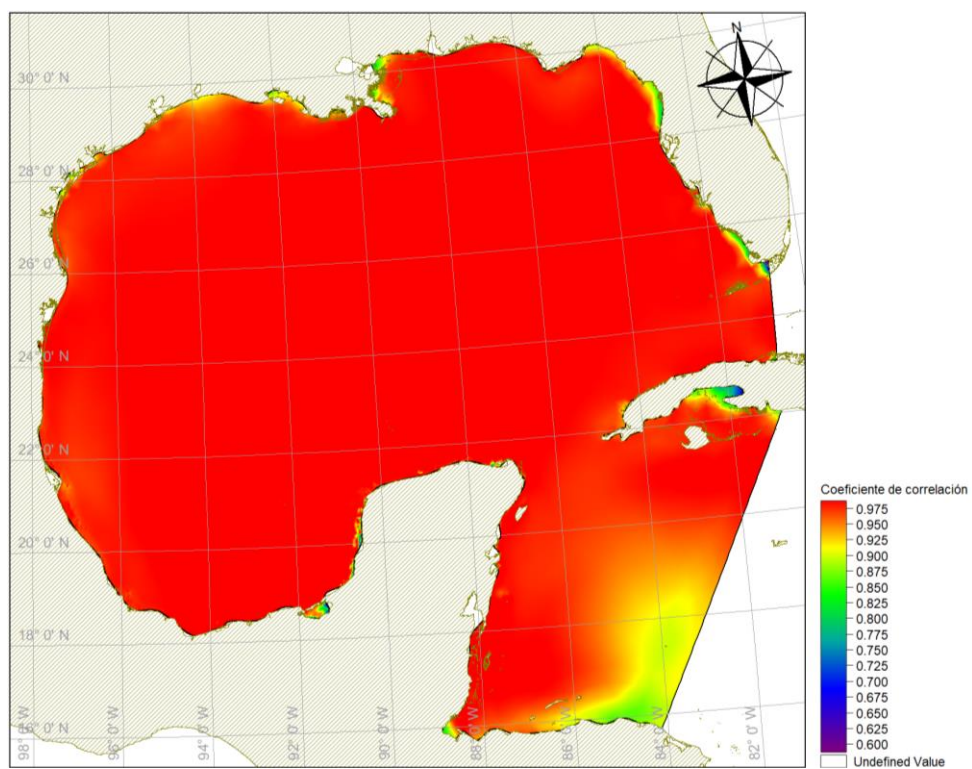


Figura 4.6 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad de Rayleigh

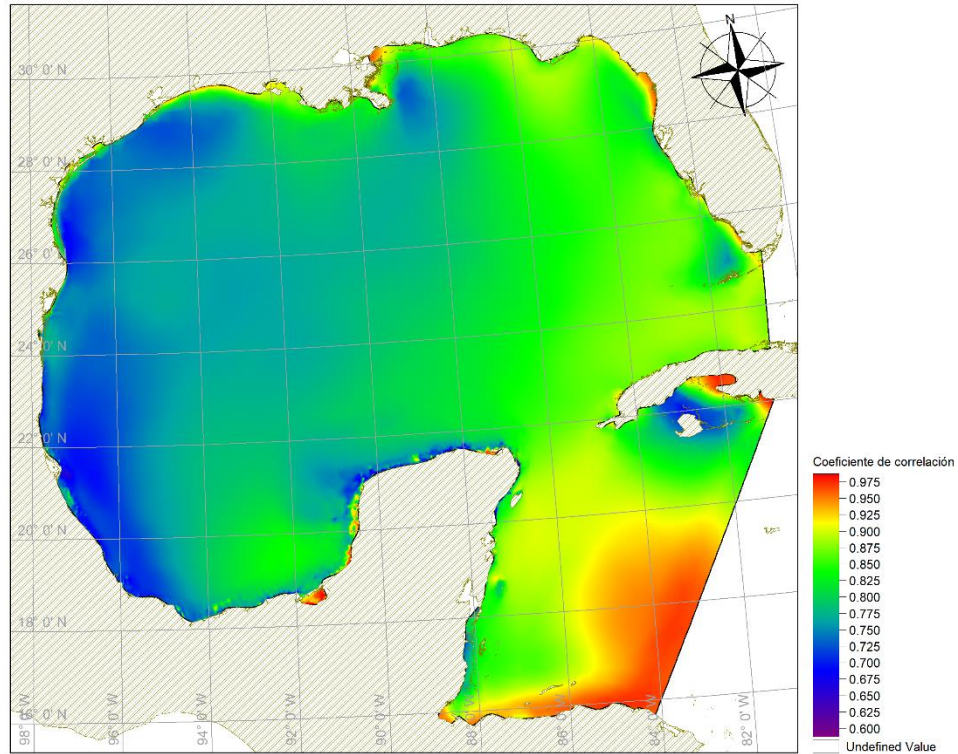


Figura 4.7 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad de Weibull con un valor de $k = 0.75$

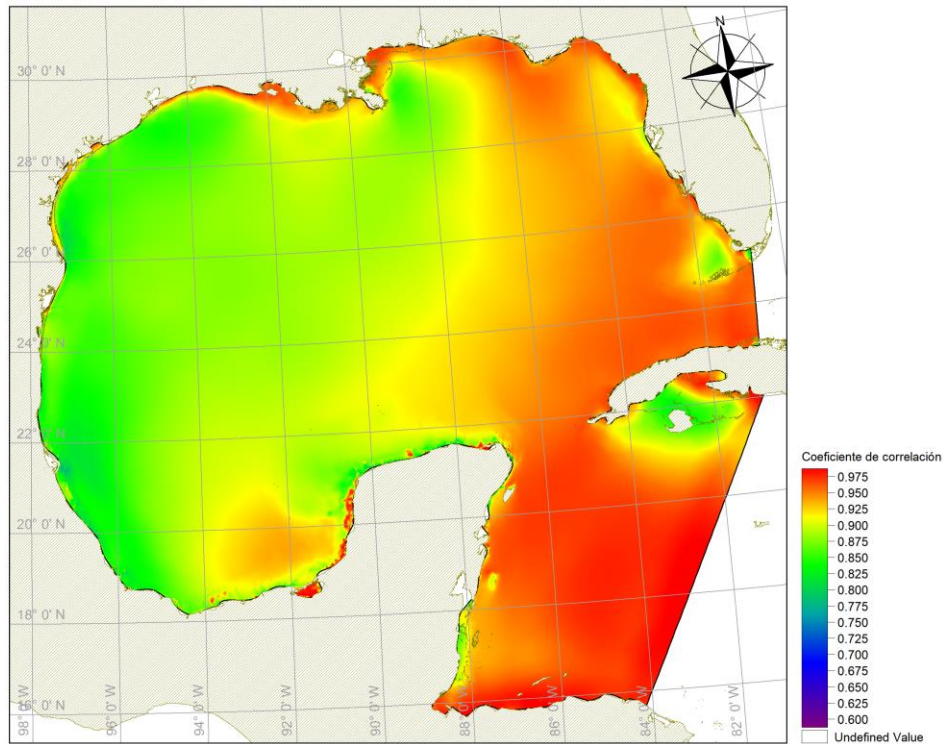


Figura 4.8 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad de Weibull con un valor de $k = 1.0$

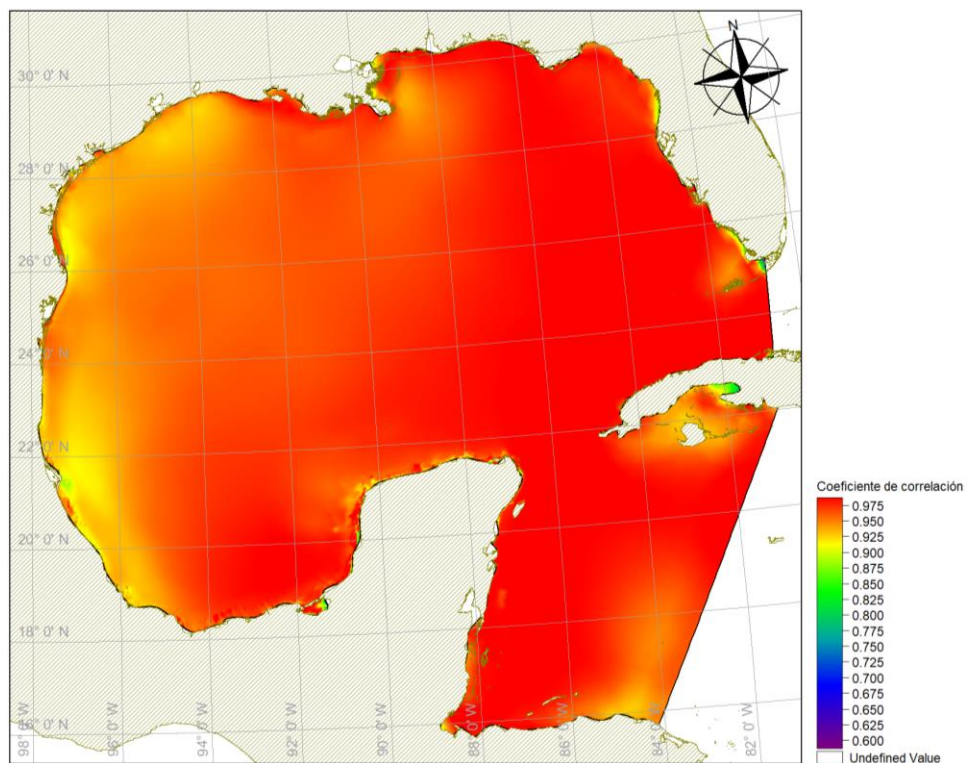


Figura 4.9 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad de Weibull con un valor de $k = 1.4$

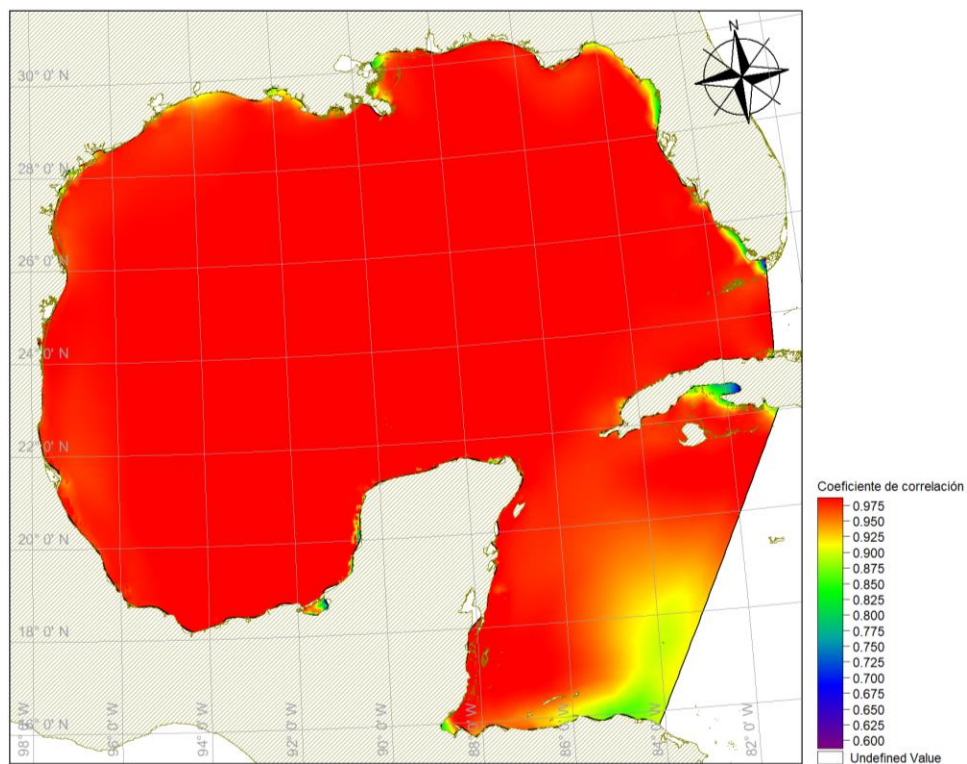


Figura 4.10 Coeficientes de correlación para la distribución de probabilidad de Weibull con un valor de $k = 2.0$

Con la información de los coeficientes de correlación para las diferentes distribuciones de probabilidad, se generó un mapa en donde se muestra que correlación se aproxima en la zona del Golfo de México, dicho mapa se muestra en la figura 4.11.

Con la información del mapa de la figura 4.11, se observa que la función de distribución Weibull con el parámetro de forma $k = 2$, es la que tiene mejor correlación (valores mayores a 0.98); en el caso del litoral de estado de Quintana Roo, la función de distribución Gumbel es la que tiene mejor correlación, y en la zona conocida como canal de Yucatán la función de distribución Weibull con el parámetro de forma $k = 1.4$, es la que tiene mejor correlación..

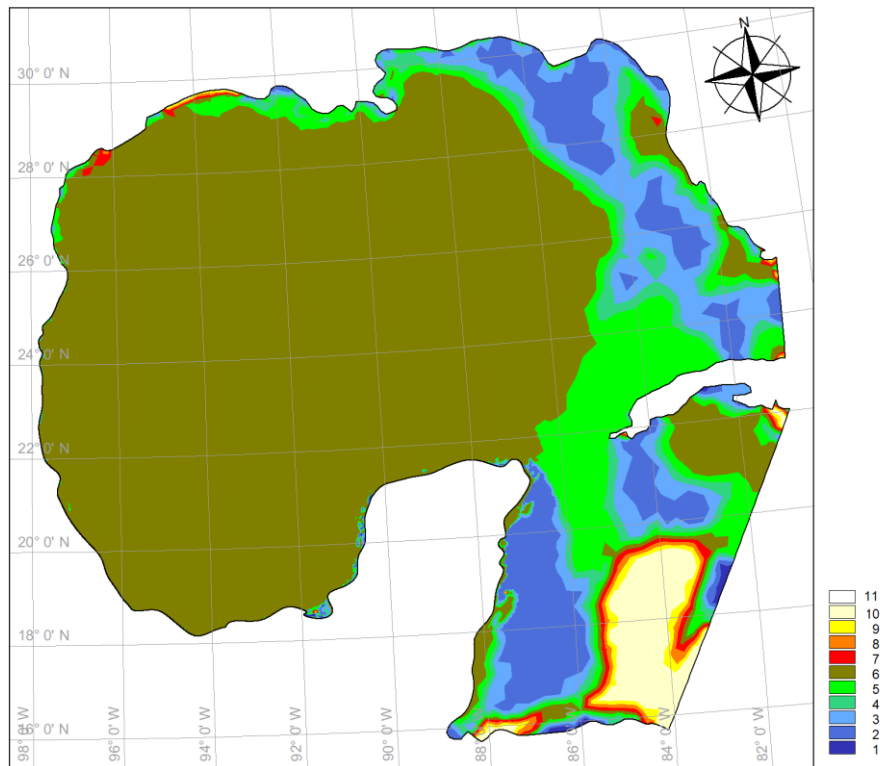


Figura 4.11 Valores de coeficientes de correlación para las diferentes distribuciones de probabilidad

Cabe mencionar que, en la figura 4.11, los colores de los coeficientes de correlación se distribuyen de la siguiente manera:

- 1 = Función de distribución Exponencial,
- 2 = Función de distribución Gumbel,
- 3 = Función de distribución Weibull con $k = 0.75$
- 4 = Función de distribución Weibull con $k = 1$
- 5 = Función de distribución Weibull con $k = 1.4$
- 6 = Función de distribución Weibull con $k = 2$
- 7 = Función de distribución Frechet con $k = 2.5$

8 = Función de distribución Frechet con $k = 3.3$

9 = Función de distribución Frechet con $k = 5$

10 = Función de distribución Frechet con $k = 10$

11 = Función de distribución Rayleigh.

Para conocer el comportamiento de las alturas de ola que se obtuvieron con las modelaciones numéricas, se realizó el análisis del oleaje en varios puntos del Golfo de México, la ubicación de dichos puntos se encuentra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Ubicación en coordenadas geográficas de los 10 puntos de análisis

Sitios	Latitud	Longitud
Punto_01	25.0	-97.0
Punto_02	23.0	-97.2
Punto_03	21.0	-96.8
Punto_04	19.4	-95.7
Punto_05	18.9	-93.7
Punto_06	19.2	-91.7
Punto_07	21.0	-90.8
Punto_08	22.0	-88.8
Punto_09	21.8	-86.6
Punto_10	19.8	-87.0

En la figura 4.12, se muestra en una imagen de Google Earth, la posición de cada uno de los puntos referidos de la tabla 4.1.



Figura 4.12 Puntos de extracción sobre el Golfo de México

Para los puntos antes mencionados, se realizó el análisis de intervalos de confianza (IC). Este intervalo se calcula con el apoyo de datos de oleaje y técnicas estadísticas, y generalmente, se expresa como un rango de valores con un nivel de confianza asociado. Por ejemplo, un intervalo de confianza del 95% indica que se espera que el valor real del oleaje se encuentre dentro de ese rango con una confianza del 95%.

El intervalo de confianza en oleaje sirve para proporcionar una estimación precisa y confiable del rango en el cual se espera que se encuentre el valor real del oleaje. Esto es útil en diversas aplicaciones, como en la planificación de actividades relacionadas con el mar, como la navegación, el turismo costero, la pesca, la construcción de infraestructuras marítimas, entre otras.

El resultado final será un rango de valores que representa el intervalo de confianza en el cual se espera que se encuentre el valor real del oleaje con el nivel de confianza especificado.

El intervalo de confianza en oleaje también permite evaluar la precisión y confiabilidad de los modelos y pronósticos del oleaje, el cual ayuda a mejorar las técnicas de predicción y aporta información más precisa a los usuarios. En resumen, el intervalo de confianza en oleaje es una herramienta importante para tomar decisiones informadas y gestionar de manera segura y eficiente las actividades relacionadas con el mar.

Para este estudio se realizaron intervalos de confianza del 95 % y 5 %, estos resultados se muestran en el anexo 2 “Gráficas de altura de ola vs períodos de retorno”, en los cuales se muestra las gráficas de los intervalos de confianza para los 10 puntos de análisis y con las diferentes distribuciones de probabilidad (Exponencial, Gumbel, Rayleigh, Weibull y Frechet).

Con dichos resultados se observa la variabilidad de la altura de olas máxima que se genera con las diferentes funciones de distribución de probabilidad en cada uno de los puntos analizados.

Conclusiones

Un evento de “Norte” es un fenómeno meteorológico caracterizado por fuertes vientos fríos que se producen cuando una masa de aire frío se desplaza del Norte hacia el Sur. Estos eventos, en el Golfo de México, suelen ocurrir durante los meses de invierno, entre noviembre y febrero, el cual afecta a la infraestructura portuaria del país, así como a las personas y a la economía local.

En este estudio se obtuvieron mapas de oleaje para 5 funciones de distribución de probabilidad (Exponencial, Gumbel, Rayleigh, Weibull y Frechet) y con varios períodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100 años). En los mapas de oleaje, de las figuras 3.7 a 3.17, y para un período de retorno de 50 años, se observa que: con la función Exponencial se obtienen valores de 10 m, como altura de ola máxima, la cual afecta a la zona sur del estado de Veracruz; en el caso de la función Frechet, y para sus diferentes parámetros de forma k , fue con la que se obtuvieron mayores valores de altura ola respecto a las otras funciones, con valores de hasta 14 m, porque dañan todo el litoral del estado de Veracruz; para la distribución Gumbel se determinaron valores de hasta 10 m, en la zona sur de estado de Veracruz; la distribución Rayleigh, fue la función con la que se determinaron las menores alturas de ola respecto a las demás funciones, con valores de hasta 8 m, ya que perjudican la zona sur del estado de Veracruz, y para el caso de la función Weibull, con sus diferentes parámetros de forma k , se obtuvieron valores de altura de ola de hasta 11 m, en la zona sur de estado de Veracruz.

Por lo anterior se desprende que el oleaje debido a los eventos extremos no tropicales impacta, principalmente, al estado de Veracruz y de ahí, con menor rango, a los estados de Tamaulipas, Tabasco y Campeche, Yucatán y Quintana Roo.

Con los resultados de las funciones de distribución se obtuvieron los coeficientes de correlación de cada una de las funciones y con los resultados obtenidos, se generó un mapa de coeficientes de correlación (ver figura 4.11), en donde se observa que en el litoral del Golfo de México (estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán), la función de distribución Weibull con el parámetro de forma $k = 2$, es la que tiene mejor correlación (valores mayores a 0.98); en el caso del litoral de estado de Quintana Roo, la función de distribución Gumbel es la que tiene

mejor correlación, y en la zona conocida como canal de Yucatán la función de distribución Weibull con el parámetro de forma $k = 1.4$, es la que tiene mejor correlación.

Con base en lo anterior y con resultados de las alturas de ola para un periodo de retorno de 50 años en los puntos indicados en la figura 4.12, se puede establecer lo siguiente:

- Para los puntos 1 y 2 ubicados frente a la costa del estado de Tamaulipas, se esperarían alturas de ola de 5.7 m, con rangos de 6.0 a 5.4 m, para el 5 % y 95 % de intervalos de confianza, respectivamente.
- Para los puntos 3 y 4 ubicados frente a la costa del estado de Veracruz, se esperarían alturas de ola de 7.5 m, con rangos de 7.9 a 7.1 m, para el 5 % y 95 % de intervalos de confianza, respectivamente.
- Frente a la costa del estado de Tabasco (punto 5), se estimaron alturas de ola de 7.4 m, con rangos que van de 7.8 a 7.0 m, para el 5 % y 95 % de intervalos de confianza, respectivamente.
- Frente a la costa del estado de Campeche (punto 6), se estimaron alturas de ola de 4.1 m, con rangos que van de 4.4 a 3.9 m, para el 5 % y 95 % de intervalos de confianza, respectivamente.
- Frente a la costa del estado de Yucatán (puntos 7 y 8), se estimaron alturas de ola de 4.7 m, con rangos que van de 5.0 a 4.5 m, para el 5 % y 95 % de intervalos de confianza, respectivamente.
- Para los puntos 9 y 10 ubicados frente a la costa del estado de Quintana Roo, se esperarían alturas de ola de 4.5 m, con rangos de 4.8 y 4.3 m, para el 5 % y 95 % de intervalos de confianza, respectivamente.

Se recomienda realizar estudios, no solo de oleaje, sino también de corrientes, y con ello conocer las velocidades que se pueden generar con la presencia de eventos no tropicales (Nortes) y estimar los efectos que tendrían en la infraestructura portuaria y costera del país.

Bibliografía

- Denton, T. (2016). *Respuesta dinámica del Golfo de México al paso del frente frío intenso (Caso del frente frío No 4 de 2007)*. [Tesis para optar el grado Académico de Maestro en Ciencias de la Tierra]. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Danish Hydraulics Institute [DHI]. (2023). *Mike 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation*. [Archivo PDF]. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/M21S_W_Scientific_Doc.pdf.
- European Commission [EC]. (2023). *European Marine Observation and Data Network (EMODet)*. [Consulta en línea]. <https://emodnet.ec.europa.eu/en/bathymetry>.
- General Bathymetric Chart of the Oceans [GEBCO]. (2023). *Global Ocean and land terrain models*. [Consulta en línea]. https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/.
- González, G. (2016). *Formación y dinámica de frentes fríos*. [Tesis para optar el grado Académico de Licenciatura en Física]. México: Universidad de Sonora.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2023). *Modelos digitales batimétricos con resolución de 400 metros del relieve submarino*. <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/submarino/#Descargas>
- Lobato, R. (2019). *Análisis de la precipitación inducida por forzamiento orográfico, ente el paso de frentes fríos en la porción norte de Chiapas y Sierra de Tabasco*. [Tesis para optar el grado Académico de Maestro en Ciencias y Tecnología del Agua]. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- López, J. (2009). *Análisis del evento meteorológico del 2007 relacionado con la inundación de Tabasco*. [Tesis para optar el grado académico de Maestro en Ciencias]. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

- Lopez, L. (2016). *Pronostico del desplazamiento de los frentes fríos sobre el Golfo de México, península de Yucatán y región occidental de Cuba, campo de viento y lluvia asociado*. Cuba: Revista Cubana de Meteorología. [Consulta en línea] <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/314>
- Luna, R. (2016). *Interacción de los frentes fríos con la Sierra Madre Oriental*. [Tesis para optar el grado Académico de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física]. México: CICESE Baja California.
- Pineda, L. (2005). *Descripción del clima y modelación numérica de fenómenos meteorológicos en San Luis Potosí, México*. [Tesis para optar el grado Académico de Maestro en Ciencias Aplicadas]. México: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- National Centers for Environmental Information [NOAA]. (2023). *ETOPO Global Relief Model*. [Consulta en línea]. <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2023). *Atlantic Oceanographic & Meteorological Laboratory*. [Consulta en línea]. <https://www.aoml.noaa.gov/>.
- Prieto, R. (2008). *Metodología para la creación e implementación del sistema de alerta temprana para frentes fríos y nortes, Informe final*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ramirez, N. (2002). *Seguimiento de nortes en el litoral del Golfo de México en la temporada de 1999-2000*. España: Publicado en la Revista Geográfica. [consulta en línea]. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/314>
- Rojas, J. (2008). *Respuesta de la circulación oceánica ante el forzamiento de eventos de Norte en la zona del Sistema Arrecifal Veracruzano*. [Tesis para optar el grado Académico de Maestro en Ciencias]. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Servicio Meteorológico Nacional (2021). *Registro de variaciones del nivel del mar asociados a los frentes fríos números 39 y 40*. México: Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Todelano, N., López López, A., Ramírez Xicotencatl, R. y Segura, H. (2021). *Caracterización del estado del mar con las mediciones de oleaje de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas*. [Publicación técnica No. 644]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt644.pdf>

Anexo 1 Tablas de eventos Nortes

Tabla A1.1 Eventos “Nortes” ocurridos en 1979

Mes	Eventos
Enero	1 a las 00:00 al 4 a las 6:00 7 a las 12:00 al 9 a las 18:00 13 a las 15:00 al 15 a las 12:00 30 a las 18:00 al 1 de febrero a las 15:00
Febrero	16 a las 9:00 al 20 a las 6:00 24 a las 18:00 al 26 a las 21:00
Marzo	4 a las 0:00 al 7 a las 00:00 10 a las 12:00 al 12 a las 18:00
Abril	4 a las 9:00 al 6 a las 00:00
Mayo	4 a las 15:00 al 6 a las 15:00 11 a las 15:00 al 16 a las 00:00
Junio	10 a las 9:00 al 14 a las 21:00
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	22 a las 15:00 al 25 a las 21:00
Noviembre	31 de octubre a las 6:00 al 5 a las 00:00 10 a las 00:00 al 15 a las 12:00 22 a las 00:00 al 24 a las 12:00 28 a las 6:00 al 30 a las 21:00
Diciembre	13 a las 9:00 al 19 a las 9:00 23 a las 00:00 al 26 a las 6:00 29 a las 12:00 al 2/01/80 a las 00:00
Total	20 eventos

Tabla A1.2 Eventos “Nortes” ocurridos en 1980

Mes	Eventos
Enero	3 a las 12:00 al 5 de a las 12:00 22 a las 18:00 al 24 a las 15:00 30 a las 21:00 al 2 de Feb a las 12:00
Febrero	9 a las 3:00 al 11 a las 6:00 16 a las 3:00 al 18 a las 6:00 24 a las 18:00 al 27 a las 18:00
Marzo	1 a las 9:00 al 3 a las 15:00 13 a las 12:00 al 15 a las 3:00 17 a las 15:00 al 19 a las 12:00
Abril	3 a las 21:00 al 6 a las 6:00 12 a las 12:00 al 14 a las 21:00 26 a las 12:00 al 28 a las 9:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	19 a las 9:00 al 22 a las 21:00 24 a las 9:00 al 26 a las 9:00 28 a las 12:00 al 2 Nov. a las 21:00
Noviembre	15 a las 21:00 al 22 a las 9:00 26 a las 00:00 al 29 a las 00:00
Diciembre	9 a las 3:00 al 13 a las 6:00 19 a las 12:00 al 23 a las 3:00 24 a las 9:00 a las 26 a las 12:00
Total	20 eventos

Tabla A1.3 Eventos “Nortes” ocurridos en 1981

Mes	Eventos
Enero	7 a las 3:00 al 8 a las 15:00 9 a las 9:00 al 13 a las 15:00 16 a las 9:00 al 19 a las 3:00
Febrero	1 a las 15:00 al 4 a las 3:00 10 a las 21:00 al 15 a las 21:00 22 a las 6:00 al 24 a las 9:00
Marzo	16 a las 3:00 al 17 a las 12:00 18 a las 18:00 al 20 a las 15:00 22 a las 12:00 al 24 a las 9:00
Abril	5 a las 6:00 al 6 a las 21:00
Mayo	10 a las 6:00 al 11 a las 18:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	16 a las 12:00 al 20 a las 15:00
Octubre	18 a las 6:00 al 21 a las 00:00 23 a las 00:00 al 25 a las 6:00 26 a las 3:00 al 29 a las 15:00
Noviembre	1 a las 3:00 al 4 a las 9:00 9 a las 3:00 al 11 a las 9:00 19 a las 21:00 al 21 a las 6:00
Diciembre	1 a las 9:00 al 3 a las 15:00 4 a las 6:00 al 5 a las 18:00 14 a las 3:00 al 16 a las 00:00 17 a las 12:00 al 20 a las 00:00 23 a las 00:00 al 26 a las 6:00 28 a las 18:00 al 30 a las 21:00
Total	24 eventos

Tabla A1.4 Eventos “Nortes” ocurridos en 1982

Mes	Eventos
Enero	4 a las 00:00 al 5 a las 18:00 7 a las 15:00 al 10 a las 3:00 10 a las 9:00 al 12 a las 6:00 13 a las 12:00 al 15 a las 3:00 16 a las 18:00 al 17 a las 21:00 25 a las 15:00 al 27 a las 3:00 31 a las 00:00 al 1 feb a las 3:00
Febrero	5 a las 18:00 al 8 a las 3:00 9 a las 6:00 al 12 a las 6:00 12 a las 21:00 al 14 a las 15:00 25 a las 15:00 al 28 a las 6:00
Marzo	6 a las 00:00 al 8 a las 6:00
Abril	5 a las 21:00 al 7 a las 3:00 10 a las 15:00 al 12 a las 6:00 21 a las 12:00 al 24 a las 15:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	12 a las 6:00 al 17 a las 6:00
Noviembre	3 a las 12:00 al 6 a las 12:00 12 a las 12:00 al 14 a las 15:00 23 a las 21:00 al 26 a las 9:00
Diciembre	3 a las 12:00 al 5 a las 12:00 11 a las 15:00 al 13 a las 12:00 28 a las 9:00 al 31 a las 6:00 31 a las 18:00 al 4 (83) a las 6:00
Total	23 eventos

Tabla A1.5 Eventos “Nortes” ocurridos en 1983

Mes	Eventos
Enero	26 a las 6:00 al 28 a las 3:00
Febrero	-----
Marzo	9 a las 12:00 al 10 a las 18:00 16 a las 15:00 al 18 a las 12:00 20 a las 9:00 al 22 a las 6:00
Abril	1 a las 18:00 al 3 a las 6:00 14 a las 00:00 al 17 a las 00:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	20 a las 21:00 al 24 a las 12:00
Octubre	12 a las 6:00 al 14 a las 3:00
Noviembre	9 a las 21:00 al 11 a las 15:00 15 a las 9:00 al 17 a las 12:00 23 a las 12:00 al 25 a las 18:00
Diciembre	6 a las 3:00 al 8 a las 6:00 16 a las 12:00 al 21 a las 00:00 21 a las 21:00 al 25 a las 21:00 28 a las 9:00 al 30 a las 21:00
Total	15 eventos

Tabla A1.6 Eventos “Nortes” ocurridos en 1984

Mes	Eventos
Enero	10 a las 3:00 al 12 a las 6:00 18 a las 3:00 al 20 a las 9:00 30 a las 6:00 al 31 a las 21:00
Febrero	20 a las 12:00 al 22 a las 21:00 27 a las 3:00 al 29 a las 00:00
Marzo	5 a las 12:00 al 8 a las 00:00 19 a las 9:00 al 21 a las 6:00 28 a las 3:00 al 29 a las 15:00
Abril	14 a las 9:00 al 16 a las 3:00
Mayo	8 a las 6:00 al 10 a las 3:00 29 a las 00:00 al 31 a las 18:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	29 a las 00:00 al 1 de oct a las 18:00
Octubre	-----
Noviembre	5 a las 00:00 al 7 a las 3:00 18 a las 12:00 al 22 a las 18:00 27 a las 6:00 al 28 a las 18:00
Diciembre	5 a las 3:00 al 7 a las 9:00
Total	16 eventos

Tabla A1.7 Eventos “Nortes” ocurridos en 1985

Mes	Eventos
Enero	1 a las 9:00 al 4 a las 21:00 10 a las 9:00 al 16 a las 00:00 20 a las 6:00 al 22 las 12:00 31 a 6:00 al 3 feb a las 15:00
Febrero	5 a las 15:00 al 9 a las 12:00 11 a las 3:00 al 12 a las 15:00 24 a las 9:00 al 26 a las 21:00
Marzo	16 a las 21:00 al 19 a las 3:00 30 a las 21:00 al 2 abr a las 21:00
Abril	7 a las 9:00 al 10 a las 9:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	30 a las 6:00 al 3 oct a las 15:00
Octubre	-----
Noviembre	-----
Diciembre	1 a las 6:00 al 4 a las 6:00 5 a las 3:00 al 7 a las 9:00 11 a las 15:00 al 15 a las 3:00 24 a las 9:00 al 26 a las 21:00
Total	15 eventos

Tabla A1.8 Eventos “Nortes” ocurridos en 1986

Mes	Eventos
Enero	4 a las 12:00 al 6 a las 12:00 7 a las 15:00 al 12 a las 00:00 25 a las 15:00 al 27 a las 3:00
Febrero	10 a las 9:00 al 13 a las 9:00 22 a las 9:00 al 24 a las 9:00 27 a las 18:00 al 1 mar a las 18:00
Marzo	4 a las 6:00 al 5 a las 12:00 19 a las 9: al 21 a las 21:00
Abril	-----
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	12 a las 15:00 al 16 a las 9:00
Noviembre	5 a las 00:00 al 6 a las 21:00 11 a las 9:00 al 16 a las 3:00 23 a las 21:00 al 26 a las 00:00
Diciembre	1 a las 9:00 al 3 a las 15:00 9 a las 15:00 al 14 a las 12:00 18 a las 15:00 al 21 a las 00:00
Total	15 eventos

Tabla A1.9 Eventos “Nortes” ocurridos en 1987

Mes	Eventos
Enero	9 a las 18:00 al 12 a las 15:00 18 a las 3:00 al 20 a las 9:00
Febrero	6 a las 3:00 al 8 a las 15:00 22 a las 3:00 al 23 a las 18:00
Marzo	29 a las 9:00 al 31 a las 18:00
Abril	2 a las 21:00 al 4 a las 9:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	30 a las 3:00 al 2 oct a las 9:00
Octubre	27 a las 3:00 al 29 a las 9:00
Noviembre	9 a las 6:00 al 11 a las 15:00 18 a las 6:00 al 20 a las 21:00 27 a las 6:00 al 29 a las 9:00
Diciembre	14 a las 18:00 al 16 a las 9:00 21 a las 3:00 al 22 a las 12:00 26 a las 12:00 al 30 a las 6:00
Total	14 eventos

Tabla A1.10 Eventos “Nortes” ocurridos en 1988

Mes	Eventos
Enero	1 a las 3:00 al 3 a las 21:00 7 a las 6:00 al 12 a las 00:00 13 a las 3:00 al 15 a las 3:00 20 a las 9:00 al 22 a las 6:00 24 a las 15:00 al 26 a las 6:00
Febrero	4 a las 6:00 al 7 a las 12:00 11 a las 6:00 al 13 a las 00:00 15 a las 6:00 al 16 a las 3:00 20 a las 00:00 al 21 a las 18:00
Marzo	9 a las 00:00 al 10 a las 9:00 12 a las 21:00 al 15 a las 18:00 18 a las 3:00 al 20 a las 9:00
Abril	6 a las 6:00 al 8 a las 9:00 10 a las 9:00 al 12 a las 12:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	2 a las 12:00 al 6 a las 3:00
Noviembre	16 a las 9:00 al 17 a las 21:00 27 a las 6:00 al 29 a las 15:00 30 a las 6:00 al 2 dic a las 15:00
Diciembre	15 a las 18:00 al 18 a las 3:00 28 a las 00:00 al 29 a las 18:00
Total	20 eventos

Tabla A1.11 Eventos “Nortes” ocurridos en 1989

Mes	Eventos
Enero	8 a las 12:00 al 11 a las 9:00 12 a las 21:00 al 15 a las 9:00
Febrero	6 a las 18:00 al 11 a las 3:00 21 a las 12:00 al 24 a las 9:00
Marzo	4 a las 21:00 al 8 a las 00:00 21 a las 6:00 al 22 a las 21:00 30 a las 21:00 al 1 abr a las 3:00
Abril	9 a las 18:00 al 12 a las 6:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	23 a las 3:00 al 24 a las 12:00
Octubre	17 a las 12:00 al 20 a las 15:00 30 a las 21:00 al 1 nov a las 3:00
Noviembre	15 a las 12:00 al 17 a las 15:00 22 a las 21:00 al 24 a las 12:00 28 a las 9:00 al 1 dic a las 18:00
Diciembre	7 a las 18:00 al 10 a las 3:00 11 a las 18:00 al 13 a las 21:00 21 a las 6:00 al 24 a las 15:00 31 a las 15:00 al 1 ene 90 a las 9:00
Total	18 eventos

Tabla A1.12 Eventos “Nortes” ocurridos en 1990

Mes	Eventos
Enero	7 a las 6:00 al 9 a las 3:00 25 a las 00:00 al 27 a las 3:00
Febrero	3 a las 18:00 al 5 a las 15:00 16 a las 9:00 al 18 a las 12:00
Marzo	1 a las 6:00 al 3 a las 15:00
Abril	6 a las 18:00 al 8 a las 9:00 11 a las 6:00 al 12 a las 6:00
Mayo	5 a las 9:00 al 7 a las 9:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	22 a las 18:00 al 24 a las 21:00
Octubre	9 a las 15:00 al 10 a las 18:00
Noviembre	4 a las 21:00 al 6 a las 12:00 9 a las 3:00 al 11 a las 00:00 29 a las 00:00 al 30 a las 21:00
Diciembre	3 a las 12:00 al 6 a las 3:00 7 a las 00:00 al 9 a las 3:00 18 a las 9:00 al 19 a las 9:00 22 a las 21:00 al 25 a las 15:00
Total	17 eventos

Tabla A1.13 Eventos “Nortes” ocurridos en 1991

Mes	Eventos
Enero	20 a las 15:00 al 22 a las 21:00 30 a las 15:00 al 1 feb a las 3:00
Febrero	20 a las 00:00 al 22 a las 3:00 25 a las 18:00 al 28 a las 00:00
Marzo	8 a las 6:00 al 11 a las 9:00
Abril	-----
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	25 a las 3:00 al 26 a las 12:00
Octubre	
Noviembre	2 a las 15:00 al 6 a las 6:00 8 a las 00:00 al 9 a las 21:00 20 a las 00:00 al 22 a las 9:00 23 a las 9:00 al 25 a las 18:00
Diciembre	3 a las 6:00 al 5 a las 12:00 14 a las 3:00 al 16 a las 9:00
Total	12 eventos

Tabla A1.14 Eventos “Nortes” ocurridos en 1992

Mes	Eventos
Enero	13 a las 15:00 al 15 a las 3:00
Febrero	19 a las 9:00 al 20 a las 12:00 25 a las 9:00 al 26 a las 21:00
Marzo	10 a las 6:00 al 12 a las 00:00 23 a las 00:00 al 24 a las 9:00
Abril	20 a las 6:00 al 21 a las 21:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	26 a las 21:00 al 1 oct a las 6:00
Octubre	
Noviembre	4 a las 6:00 al 7 a las 3:00 12 a las 12:00 al 14 a las 9:00 21 a las 18:00 al 23 a las 9:00 25 a las 6:00 al 28 a las 9:00
Diciembre	17 a las 3:00 al 18 a las 18:00
Total	12 eventos

Tabla A1.15 Eventos “Nortes” ocurridos en 1993

Mes	Eventos
Enero	24 a las 6:00 al 25 a las 21:00
Febrero	5 a las 15:00 al 7 a las 12:00
Marzo	-----
Abril	-----
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	14 a las 21:00 al 16 a las 3:00 27 a las 6:00 al 30 a las 21:00
Octubre	30 a las 00:00 al 31 a las 21:00
Noviembre	5 a las 15:00 al 8 a las 00:00 17 a las 6:00 al 18 a las 21:00 19 a las 18:00 al 21 a las 21:00 26 a las 00:00 al 29 a las 00:00
Diciembre	4 a las 6:00 al 5 a las 18:00 22 a las 9:00 al 24 a las 3:00 24 a las 9:00 al 25 a las 15:00 29 a las 6:00 al 31 a las 21:00
Total	13 eventos

Tabla A1.16 Eventos “Nortes” ocurridos en 1994

Mes	Eventos
Enero	3 a las 00:00 al 4 a las 12:00 7 a las 12:00 al 9 a las 3:00 12 a las 21:00 al 15 a las 3:00 28 a las 3:00 al 31 a las 21:00
Febrero	9 a las 18:00 al 11 a las 00:00 13 a las 3:00 al 15 a las 3:00 23 a las 15:00 al 25 a las 3:00
Marzo	9 a las 9:00 al 11 a las 9:00 28 a las 12:00 al 30 a las 00:00
Abril	6 a las 9:00 al 7 a las 18:00
Mayo	4 a las 21:00 al 6 a las 9:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	25 a las 21:00 al 27 a las 12:00
Noviembre	29 a las 9:00 al 2 dic a las 9:00
Diciembre	10 a las 9:00 al 12 a las 00:00
Total	14 eventos

Tabla A1.17 Eventos “Nortes” ocurridos en 1995

Mes	Eventos
Enero	3 a las 00:00 al 4 a las 12:00 7 a las 12:00 al 9 a las 3:00 12 a las 21:00 al 15 a las 3:00 28 a las 3:00 al 31 a las 21:00
Febrero	9 a las 18:00 al 11 a las 00:00 13 a las 3:00 al 15 a las 3:00 23 a las 15:00 al 25 a las 3:00
Marzo	9 a las 9:00 al 11 a las 9:00 28 a las 12:00 al 30 a las 00:00
Abril	6 a las 9:00 al 7 a las 18:00
Mayo	4 a las 21:00 al 6 a las 9:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	25 a las 21:00 al 27 a las 12:00
Noviembre	29 a las 9:00 al 2 dic a las 9:00
Diciembre	10 a las 9:00 al 12 a las 00:00
Total	14 eventos

Tabla A1.18 Eventos “Nortes” ocurridos en 1996

Mes	Eventos
Enero	2 a las 20:00 al 4 a las 6:00 18 a las 15:00 al 21 a las 00:00 24 a las 3:00 al 25 a las 21:00 31 a las 3:00 al 4 feb a las 12:00
Febrero	15 a las 21:00 al 17 a las 15:00 28 a las 9:00 al 3 mar a las 00:00
Marzo	7 a las 00:00 al 11 a las 00:00 15 a las 18:00 al 21 a las 15:00 31 a las 9:00 al 2 abr a las 15:00
Abril	15 a las 6:00 al 17 a las 9:00 23 a las 6:00 al 25 a las 3:00 29 a las 12:00 al 30 a las 21:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	27 a las 21:00 al 2 de oct a las 00:00
Octubre	22 a las 9:00 al 24 a las 3:00
Noviembre	2 a las 00:00 al 4 a las 9:00 8 a las 00:00 al 9 a las 21:00 24 a las 18:00 al 26 a las 9:00
Diciembre	8 a las 3:00 al 9 a las 3:00 17 a las 21:00 al 20 a las 9:00 24 a las 9:00 al 25 a las 21:00
Total	20 eventos

Tabla A1.19 Eventos “Nortes” ocurridos en 1997

Mes	Eventos
Enero	6 a las 9:00 al 10 a las 12:00 28 a las 6:00 al 30 a las 6:00
Febrero	7 a las 18:00 al 9 a las 18:00 14 a las 00:00 al 16 a las 6:00 22 a las 00:00 al 23 a las 12:00
Marzo	5 a las 18:00 7 a las 15:00 14 a las 18:00 al 16 a las 9:00 19 a las 3:00 al 20 a las 15:00
Abril	11 a las 21:00 al 15 a las 12:00
Mayo	3 a las 6:00 al 4 a las 21:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	13 a las 12:00 al 18 a las 3:00 16 a las 9:00 al 28 a las 9:00
Noviembre	15 a las 9:00 al 18 a las 6:00
Diciembre	11 a las 00:00 al 15 a las 3:00 26 a las 18:00 al 28 a las 9:00
Total	15 eventos

Tabla A1.20 Eventos “Nortes” ocurridos en 1998

Mes	Eventos
Enero	15 a las 9:00 al 16 a las 21:00
Febrero	
Marzo	8 a las 12:00 al 10 a las 18:00 20 a las 00:00 al 21 a las 21:00 31 a las 12:00 al 2 abr a las 00:00
Abril	9 a las 12:00 al 11 a las 21:00 18 a las 6:00 al 21 a las 12:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	7 a las 6:00 al 10 a las 3:00 22 a las 18:00 al 24 a las 18:00
Noviembre	10 a las 21:00 al 12 a las 21:00
Diciembre	8 a las 3:00 al 10 a las 9:00 10 a las 18:00 al 14 a las 3:00 22 a las 6:00 al 27 a las 3:00
Total	12 eventos

Tabla A1.21 Eventos “Nortes” ocurridos en 1999

Mes	Eventos
Enero	9 a las 3:00 al 11 a las 9:00 14 a las 15:00 al 16 a las 9:00 30 a las 12:00 al 31 a las 21:00
Febrero	11 a las 21:00 al 13 a las 21:00 21 a las 3:00 al 22 a las 12:00
Marzo	14 a las 3:00 al 16 a las 9:00
Abril	15 a las 9:00 al 18 a las 6:00 30 a las 3:00 al 1 may a las 9:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	17 a las 21:00 al 23 a las 3:00 31 a las 3:00 al 3 a las 21:00
Noviembre	24 a las 3:00 al 27 a las 6:00
Diciembre	5 a las 6:00 al 7 a las 00:00 13 a las 3:00 al 14 a las 3:00 15 a las 3:00 al 17 a las 18:00 21 a las 6:00 al 25 a las 6:00
Total	15 eventos

Tabla A1.22 Eventos “Nortes” ocurridos en 2000

Mes	Eventos
Enero	4 a las 00:00 al 6 a las 3:00 13 a las 21:00 al 15 a las 9:00 24 a las 3:00 al 25 a las 15:00
Febrero	26 a las 18:00 al 28 a las 9:00
Marzo	11 a las 3:00 al 13 a las 6:00
Abril	3 a las 21:00 al 5 a las 9:00 8 a las 6:00 al 9 a las 18:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	25 a las 6:00 al 27 a las 21:00
Octubre	7 a las 9:00 al 11 a las 9:00
Noviembre	13 a las 6:00 al 15 a las 21:00 17 a las 9:00 al 20 a las 21:00
Diciembre	2 a las 3:00 al 3 a las 15:00 12 a las 00:00 al 12 a las 21:00 16 a las 18:00 al 18 a las 3:00 18 a las 21:00 al 23 a las 3:00 27 a las 00:00 al 30 a las 6:00
Total	16 eventos

Tabla A1.23 Eventos “Nortes” ocurridos en 2001

Mes	Eventos
Enero	1 a las 15:00 al 4 a las 6:00 8 a las 3:00 al 9 a las 12:00 18 a las 18:00 al 21 a las 6:00 31 a las 12:00 al 4 feb a las 18:00
Febrero	9 a las 15:00 al 11 a las 6:00 16 a las 15:00 al 18 a las 18:00
Marzo	25 a las 6:00 al 27 a las 3:00
Abril	17 a las 9:00 al 19 a las 9:00 24 a las 12:00 al 28 a las 3:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	6 a las 21:00 al 8 a las 00:00 16 a las 6:00 al 19 a las 3:00 25 a las 15:00 al 28 a las 6:00
Noviembre	20 a las 6:00 al 21 a las 21:00
Diciembre	8 a las 15:00 al 11 a las 9:00 19 a las 9:00 al 21 a las 00:00 23 a las 6:00 al 27 a las 3:00
Total	16 eventos

Tabla A1.24 Eventos “Nortes” ocurridos en 2002

Mes	Eventos
Enero	11 a las 15:00 al 13 a las 15:00 24 a las 15:00 al 27 a las 12:00
Febrero	1 a las 00:00 al 3 a las 9:00 10 a las 6:00 al 12 a las 15:00 22 a las 3:00 al 24 a las 00:00 26 a las 9:00 a las 28 a las 6:00
Marzo	2 a las 18:00 al 6 a las 9:00 9 a las 15:00 al 11 a las 00:00 26 a las 3:00 al 28 a las 3:00
Abril	-----
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	30 a las 21:00 al 2 a las 12:00
Noviembre	12 a las 6:00 al 14 a las 00:00 15 a las 21:00 al 17 a las 21:00 26 a las 15:00 al 29 a las 18:00
Diciembre	4 a las 12:00 al 7 a las 9:00 19 a las 15:00 al 21 a las 00:00 24 a las 21:00 al 25 a las 21:00
Total	16 eventos

Tabla A1.25 Eventos “Nortes” ocurridos en 2003

Mes	Eventos
Enero	2 a las 3:00 al 3 a las 21:00 10 a las 6:00 al 12 a las 00:00 16 a las 15:00 al 18 a las 3:00 22 a las 18:00 al 24 a las 15:00
Febrero	4 a las 00:00 al 5 a las 6:00
Marzo	28 a las 18:00 al 31 a las 18:00
Abril	8 a las 12:00 al 11 a las 21:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	28 a las 9:00 al 30 a las 6:00
Octubre	-----
Noviembre	13 a las 9:00 al 15 a las 00:00 23 a las 21:00 al 25 a las 9:00 27 a las 21:00 al 30 a las 12:00
Diciembre	5 a las 3:00 al 7 a las 9:00 16 a las 9:00 al 18 a las 3:00
Total	13 eventos

Tabla A1.26 Eventos “Nortes” ocurridos en 2004

Mes	Eventos
Enero	5 a las 3:00 al 8 a las 15:00 9 a las 9:00 al 11 a las 15:00 18 a las 15:00 al 20 a las 15:00 27 a las 00:00 al 29 a las 00:00
Febrero	12 a las 15:00 al 14 a las 6:00 25 a las 18:00 al 27 a las 12:00
Marzo	-----
Abril	-----
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	-----
Noviembre	2 a las 12:00 al 5 a las 21:00 24 a las 9:00 al 26 a las 00:00 30 a las 6:00 al 2 a las 15:00
Diciembre	13 a las 12:00 al 16 a las 00:00 23 a las 6:00 al 24 a las 15:00
Total	11 eventos

Tabla A1.27 Eventos “Nortes” ocurridos en 2005

Mes	Eventos
Enero	13 a las 18:00 al 15 a las 3:00 22 a las 21:00 al 24 a las 12:00
Febrero	10 a las 00:00 al 12 a las 6:00
Marzo	27 a las 9:00 al 28 a las 21:00
Abril	1 a las 12:00 al 2 a las 21:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	7 a las 00:00 al 9 a las 3:00
Noviembre	1 a las 00:00 al 2 a las 21:00 16 a las 00:00 al 18 a las 00:00 28 a las 18:00 al 30 a las 18:00
Diciembre	4 a las 21:00 al 7 a las 18:00 11 a las 6:00 al 12 a las 15:00
Total	11 eventos

Tabla A1.28 Eventos “Nortes” ocurridos en 2006

Mes	Eventos
Enero	5 a las 3:00 al 7 a las 9:00 13 a las 12:00 al 15 a las 9:00 17 a ñas 3:00 al 19 a las 3:00
Febrero	3 a las 21:00 al 5 a las 6:00 6 a las 18:00 al 8 a las 9:00 11 a las 00:00 al 13 a las 3:00 26 a las 3:00 al 27 a las 9:00
Marzo	14 a las 9:00 al 15 a las 21:00 21 a las 18:00 al 25 a las 15:00
Abril	8 a las 12:00 al 12 a las 12:00
Mayo	11 a las 6:00 al 12 a las 15:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	19 a las 9:00 al 21 a las 6:00 22 a las 6:00 al 25 a las 6:00
Noviembre	2 a las 6:00 al 4 a las 9:00 11 a las 6:00 al 13 a las 3:00 15 a las 18:00 al 17 a las 00:00 30 a las 15:00 al 2 dic a las 9:00
Diciembre	3 a las 00:00 al 5 a las 3:00 7 a las 12:00 al 9 a las 18:00
Total	19 eventos

Tabla A1.29 Eventos “Nortes” ocurridos en 2007

Mes	Eventos
Enero	7 a las 3:00 al 9 a las 3:00 15 a las 21:00 al 18 a las 3:00
Febrero	3 a las 9:00 al 6 a las 18:00 14 a las 9:00 al 17 a las 9:00 18 a las 00:00 al 19 a las 6:00
Marzo	3 a las 21:00 al 5 a las 18:00
Abril	4 a las 18:00 al 7 a las 3:00 14 a las 12:00 al 16 a las 3:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	29 a las 21:00 al 2 oct a las 9:00
Octubre	22 a las 12:00 al 24 a las 15:00
Noviembre	15 a las 9:00 al 16 a las 18:00 22 a las 6:00 al 24 a las 3:00
Diciembre	3 a las 6:00 al 5 a las 3:00 22 a las 21:00 al 24 a las 3:00
Total	14 eventos

Tabla A1.30 Eventos “Nortes” ocurridos en 2008

Mes	Eventos
Enero	1 a las 3:00 al 3 a las 00:00 12 a las 21:00 al 14 a las 18:00 19 a las 15:00 al 21 a las 00:00 31 a las 21:00 al 2 feb a las 6:00
Febrero	13 a las 3:00 al 14 a las 3:00 26 a las 12:00 al 28 a las 3:00
Marzo	3 a las 21:00 al 5 a las 3:00 19 a las 15:00 al 20 a las 15:00 23 a las 9:00 al 25 a las 6:00
Abril	12 a las 6:00 al 14 a las 9:00 28 a las 9:00 al 29 a las 15:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	23 a las 21:00 al 29 a las 9:00
Octubre	16 a las 21:00 al 20 a las 9:00
Noviembre	15 a las 00:00 al 16 a las 18:00 20 a las 21:00 al 22 a las 3:00
Diciembre	4 a las 18:00 al 8 a las 00:00 10 a las 00:00 al 11 a las 3:00 21 a las 6:00 al 23 a las 00:00 28 a las 3:00 al 30 a las 15:00
Total	19 eventos

Tabla A1.31 Eventos “Nortes” ocurridos en 2009

Mes	Eventos
Enero	10 a las 18:00 al 12 a las 21:00 29 a las 15:00 al 31 a las 18:00
Febrero	19 a las 9:00 al 21 a las 9:00 22 a las 00:00 al 23 a las 12:00 28 a las 15:00 al 2 mar a las 9:00
Marzo	28 a las 9:00 al 30 a las 00:00
Abril	6 a las 3:00 al 7 a las 9:00 20 a las 6:00 al 21 a las 6:00
Mayo	17 a las 18:00 al 18 a las 18:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	10 a las 00:00 al 12 a las 00:00 16 a las 9:00 al 19 a las 3:00 24 a las 00:00 al 25 a las 3:00 27 a las 3:00 al 28 a las 3:00 30 a las 15:00 al 4 nov a las 9:00
Noviembre	16 a las 12:00 al 18 a las 21:00 30 a las 9:00 al 1 dic a las 9:00
Diciembre	9 a las 15:00 al 10 a las 18:00 15 a las 18:00 al 17 a las 6:00
Total	18 eventos

Tabla A1.32 Eventos “Nortes” ocurridos en 2010

Mes	Eventos
Enero	1 a las 6:00 al 2 a las 15:00 7 a las 21:00 al 9 a las 21:00
Febrero	9 a las 18:00 al 11 a las 6:00 15 a las 3:00 al 16 a las 21:00 23 a las 18:00 al 25 a las 15:00
Marzo	16 a las 21:00 al 18 a las 3:00 28 a las 18:00 al 29 a las 18:00
Abril	8 a las 6:00 al 10 a las 3:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	28 a las 12:00 al 31 a las 00:00
Noviembre	2 a las 18:00 al 5 a las 15:00 26 a las 6:00 al 28 a las 6:00 30 a las 9:00 al 1 dic a las 9:00
Diciembre	12 a las 9:00 al 13 a las 21:00 18 a las 9:00 al 19 a las 18:00 25 a las 6:00 al 26 a las 15:00
Total	15 eventos

Tabla A1.33 Eventos “Nortes” ocurridos en 2011

Mes	Eventos
Enero	1 a las 15:00 al 3 a las 15:00 11 a las 9:00 al 13 a las 6:00 21 a las 00:00 al 23 a las 00:00
Febrero	2 a las 00:00 al 5 a las 15:00 7 a las 9:00 al 8 a las 12:00 9 a las 18:00 al 11 a las 6:00 28 a las 18:00 al 2 mar a las 00:00
Marzo	6 a las 00:00 al 7 a las 9:00 10 a las 00:00 al 11 a las 3:00
Abril	4 a las 21:00 al 6 a las 6:00
Mayo	3 a las 3:00 al 4 a las 21:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	30 a las 18:00 al 2 oct a las 9:00
Octubre	19 a las 00:00 al 20 a las 3:00 29 a las 00:00 al 30 a las 3:00
Noviembre	3 a las 12:00 al 5 a las 00:00 9 a las 9:00 al 11 a las 15:00 17 a las 6:00 al 18 a las 9:00 23 a las 3:00 al 24 a las 6:00 27 a las 6:00 al 28 a las 12:00
Diciembre	6 a las 15:00 al 8 a las 6:00 25 a las 6:00 al 28 a las 6:00
Total	21 eventos

Tabla A1.34 Eventos “Nortes” ocurridos en 2012

Mes	Eventos
Enero	1 a las 15:00 al 3 a las 15:00 10 a las 3:00 al 11 a las 00:00 12 a las 6:00 al 15 a las 3:00 26 a las 12:00 al 27 a las 15:00
Febrero	5 a las 9:00 al 7 a las 6:00 24 a las 15:00 al 26 a las 12:00
Marzo	3 a las 18:00 al 4 a las 21:00 9 a las 18:00 al 11 a las 9:00
Abril	21 a las 9:00 al 23 a las 3:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	7 a las 6:00 al 9 a las 15:00
Noviembre	12 a las 9:00 al 14 a las 3:00
Diciembre	10 a las 12:00 al 13 a las 00:00 20 a las 15:00 al 22 a las 00:00 29 a las 3:00 al 30 a las 3:00
Total	14 eventos

Tabla A1.35 Eventos “Nortes” ocurridos en 2013

Mes	Eventos
Enero	1 a las 15:00 al 5 a las 3:00 15 a las 18:00 al 17 a las 21:00 30 a las 12:00 al 31 a las 15:00
Febrero	8 a las 9:00 al 9 a las 9:00 16 a las 3:00 al 17 a las 3:00 27 a las 21:00 al 2 mar a las 9:00
Marzo	11 a las 6:00 al 12 a las 9:00 20 a las 15:00 al 21 a las 15:00 24 a las 15:00 al 26 a las 15:00
Abril	18 a las 21:00 al 21 a las 21:00 24 a las 12:00 al 26 a las 9:00
Mayo	3 a las 00:00 al 4 a las 21:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	19 a las 12:00 al 21 a las 3:00 22 a las 6:00 al 27 a las 21:00
Noviembre	2 a las 9:00 al 3 a las 21:00 7 a las 6:00 al 9 a las 6:00 12 a las 12:00 al 14 a las 15:00 22 a las 18:00 al 25 a las 6:00 26 a las 12:00 al 27 a las 18:00
Diciembre	6 a las 15:00 al 8 a las 6:00 10 a las 6:00 al 11 a las 18:00 14 a las 21:00 al 16 a las 3:00 22 a las 18:00 al 24 a las 3:00 27 a las 6:00 al 28 a las 12:00
Total	24 eventos

Tabla A1.36 Eventos “Nortes” ocurridos en 2014

Mes	Eventos
Enero	2 a las 12:00 al 3 a las 15:00 6 a las 00:00 al 7 a las 9:00 21 a las 9:00 al 22 a las 9:00 24 a las 00:00 al 25 a las 9:00 27 a las 21:00 al 31 a las 00:00
Febrero	3 a las 00:00 al 4 a las 00:00 5 a las 12:00 al 7 a las 15:00 11 a las 00:00 al 12 a las 18:00 21 a las 6:00 al 22 a las 6:00 26 a las 15:00 al 28 a las 3:00
Marzo	3 a las 6:00 al 4 a las 21:00 12 a las 15:00 al 13 a las 15:00 25 a las 3:00 al 26 a las 9:00
Abril	15 a las 00:00 al 15 a las 3:00
Mayo	1 a las 00:00 al 3 a las 15:00 14 a las 9:00 al 15 a las 9:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	-----
Noviembre	7 a las 15:00 al 9 a las 21:00 12 a las 00:00 al 15 a las 00:00 17 a las 6:00 al 18 a las 21:00 24 a las 18:00 al 26 a las 9:00
Diciembre	24 a las 3:00 al 25 a las 3:00 28 a las 6:00 al 29 a las 12:00
Total	22 eventos

Tabla A1.37 Eventos “Nortes” ocurridos en 2015

Mes	Eventos
Enero	4 a las 9:00 al 6 a las 18:00 13 a las 6:00 al 16 a las 15:00
Febrero	2 a las 3:00 al 4 a las 9:00 17 a las 9:00 al 18 a las 21:00 23 a las 9:00 al 25 a las 00:00
Marzo	5 a las 9:00 al 8 a las 6:00 26 a las 21:00 al 28 a las 6:00
Abril	28 a las 15:00 al 30 a las 9:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	16 a las 15:00 al 19 a las 18:00
Noviembre	7 a las 21:00 al 9 a las 18:00 21 a las 18:00 al 23 a las 18:00
Diciembre	2 a las 12:00 al 4 a las 12:00 17 a las 12:00 al 18 a las 21:00
Total	13 eventos

Tabla A1.38 Eventos “Nortes” ocurridos en 2016

Mes	Eventos
Enero	1 a las 00:00 al 4 a las 21:00 9 a las 21:00 al 11 a las 3:00 12 a las 00:00 al 13 a las 15:00 27 a las 00:00 al 28 a las 21:00
Febrero	3 a las 15:00 al 5 a las 3:00 24 a las 9:00 al 25 a las 9:00
Marzo	19 a las 15:00 al 21 a las 9:00
Abril	2 a las 00:00 al 3 a las 6:00
Mayo	3 a las 15:00 al 4 a las 15:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	8 a las 15:00 al 10 a las 3:00 21 a las 00:00 al 23 a las 6:00
Noviembre	9 a las 6:00 al 14 a las 15:00 19 a las 6:00 al 20 a las 18:00 30 a las 12:00 al 2 dic a las 00:00
Diciembre	8 a las 12:00 al 11 a las 3:00 18 a las 9:00 al 20 a las 18:00 29 a las 18:00 al 31 a las 00:00
Total	17 eventos

Tabla A1.39 Eventos “Nortes” ocurridos en 2017

Mes	Eventos
Enero	6 a las 9:00 al 8 a las 15:00 26 a las 6:00 al 27 a las 12:00 27 a las 18:00 al 29 a las 15:00
Febrero	15 a las 3:00 al 16 a las 6:00 25 a las 6:00 al 26 a las 12:00
Marzo	2 a las 6:00 al 4 a las 6:00
Abril	5 a las 15:00 al 6 a las 21:00 23 a las 3:00 al 24 a las 3:00
Mayo	4 a las 12:00 al 5 a las 12:00
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	10 a las 18:00 al 13 a las 15:00 16 a las 3:00 al 18 a las 6:00
Noviembre	9 a las 00:00 al 10 a las 3:00 19 a las 3:00 al 20 a las 18:00 22 a las 12:00 al 23 a las 18:00
Diciembre	6 a las 9:00 al 9 a las 12:00 15 a las 12:00 al 16 a las 15:00 23 a las 6:00 al 24 a las 12:00
Total	17 eventos

Tabla A1.40 Eventos “Nortes” ocurridos en 2018

Mes	Eventos
Enero	1 a las 00:00 al 4 a las 6:00 12 a las 3:00 al 13 a las 3:00 16 a las 15:00 al 18 a las 6:00
Febrero	7 a las 21:00 al 9 a las 21:00 11 a las 21:00 al 13 a las 6:00
Marzo	6 a las 18:00 al 8 a las 6:00 12 a las 00:00 al 13 a las 6:00
Abril	7 a las 21:00 al 8 a las 21:00 14 a las 12:00 al 15 a las 15:00
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	16 a las 00:00 al 19 a las 15:00
Noviembre	2 a las 12:00 al 3 a las 12:00 9 a las 12:00 al 11 a las 9:00 12 a las 18:00 al 15 a las 00:00 20 a las 6:00 al 21 a las 15:00 26 a las 00:00 al 27 a las 15:00
Diciembre	3 a las 21:00 al 5 a las 3:00 14 a las 6:00 al 15 a las 6:00
Total	17 eventos

Tabla A1.41 Eventos “Nortes” ocurridos en 2019

Mes	Eventos
Enero	19 a las 15:00 al 20 a las 9:00 29 a las 9:00 al 30 a las 9:00
Febrero	
Marzo	3 a las 21:00 al 6 a las 9:00 15 a las 6:00 al 17 a las 6:00 17 a las 6:00 al 19 a las 12:00 31 a las 6:00 al 2 abr a las 9:00
Abril	-----
Mayo	-----
Junio	-----
Julio	-----
Agosto	-----
Septiembre	-----
Octubre	-----
Noviembre	-----
Diciembre	-----
Total	6 eventos

Anexo 2 Gráficas de altura de ola vs períodos de retorno

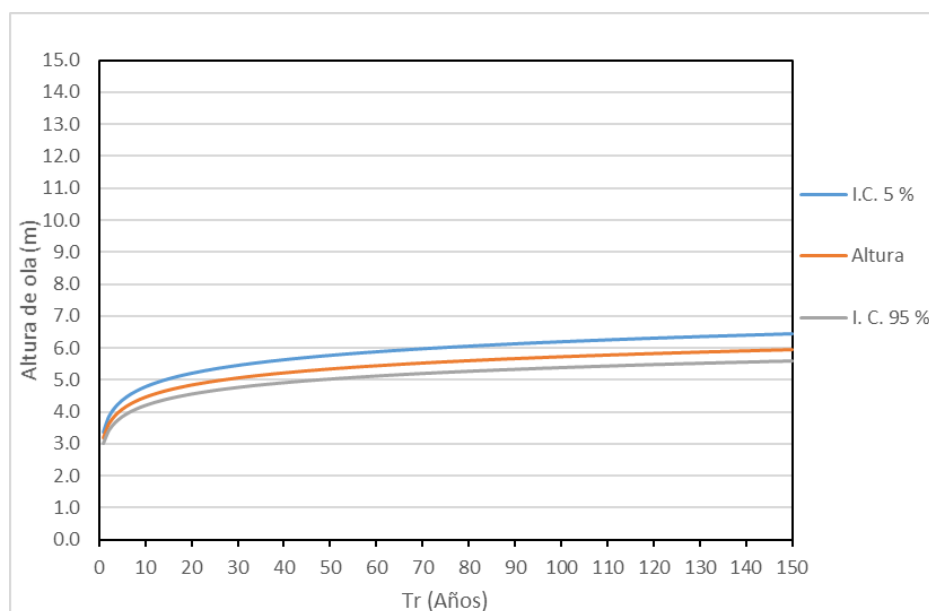


Figura A2.1 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 01

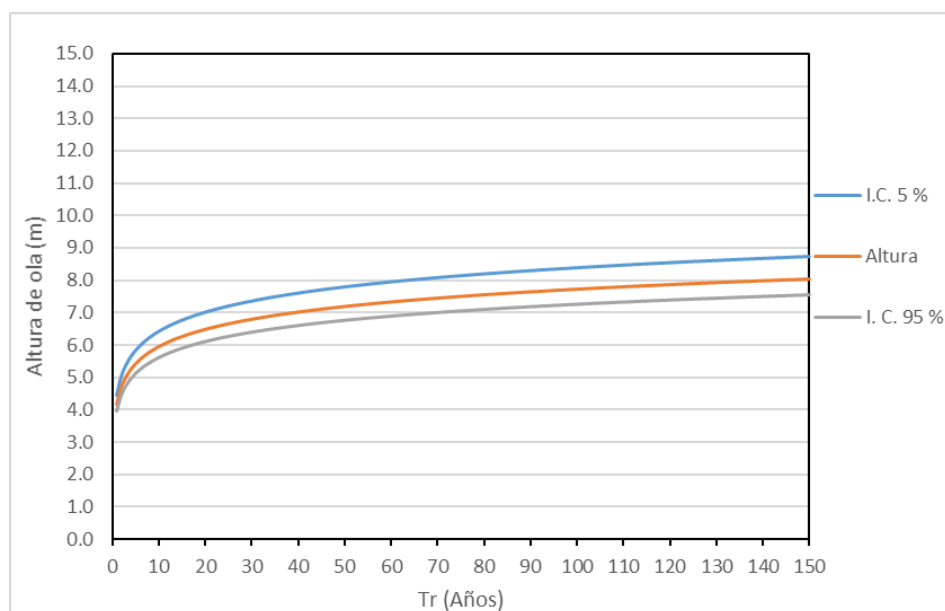


Figura A2.2 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 02

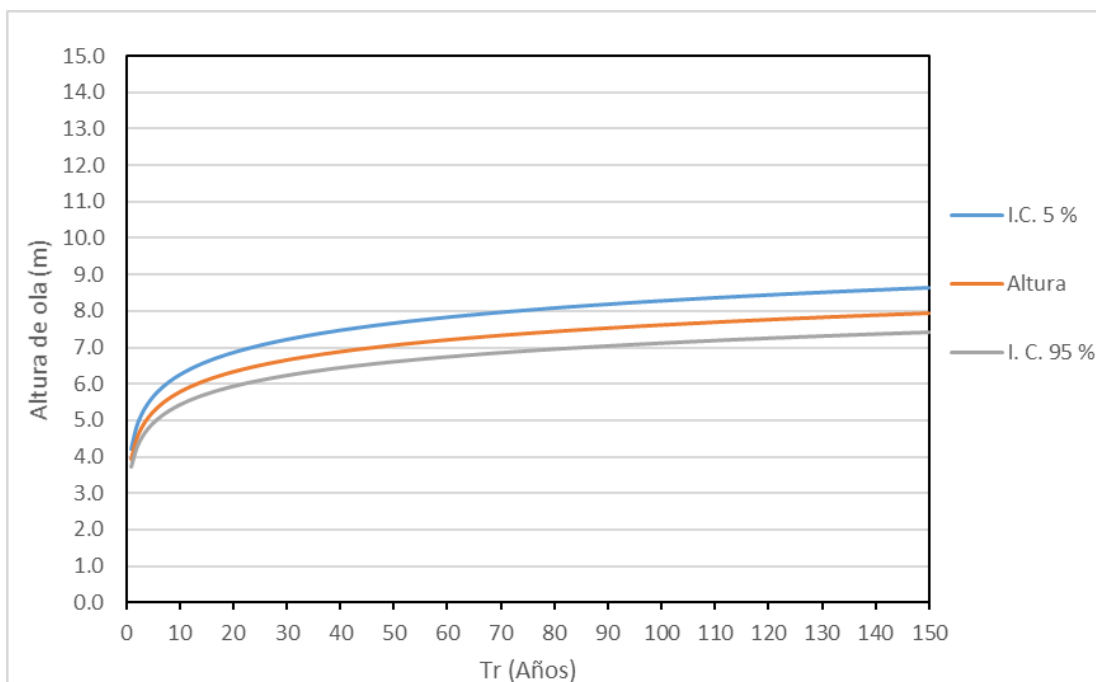


Figura A2.3 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 03

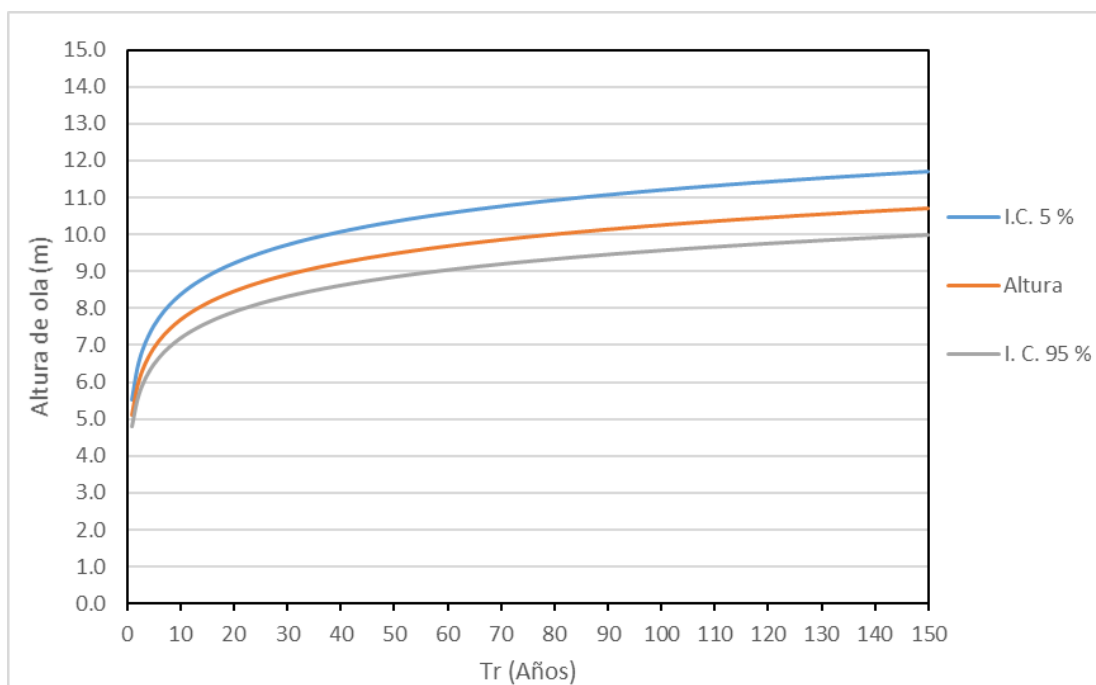


Figura A2.4 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 04

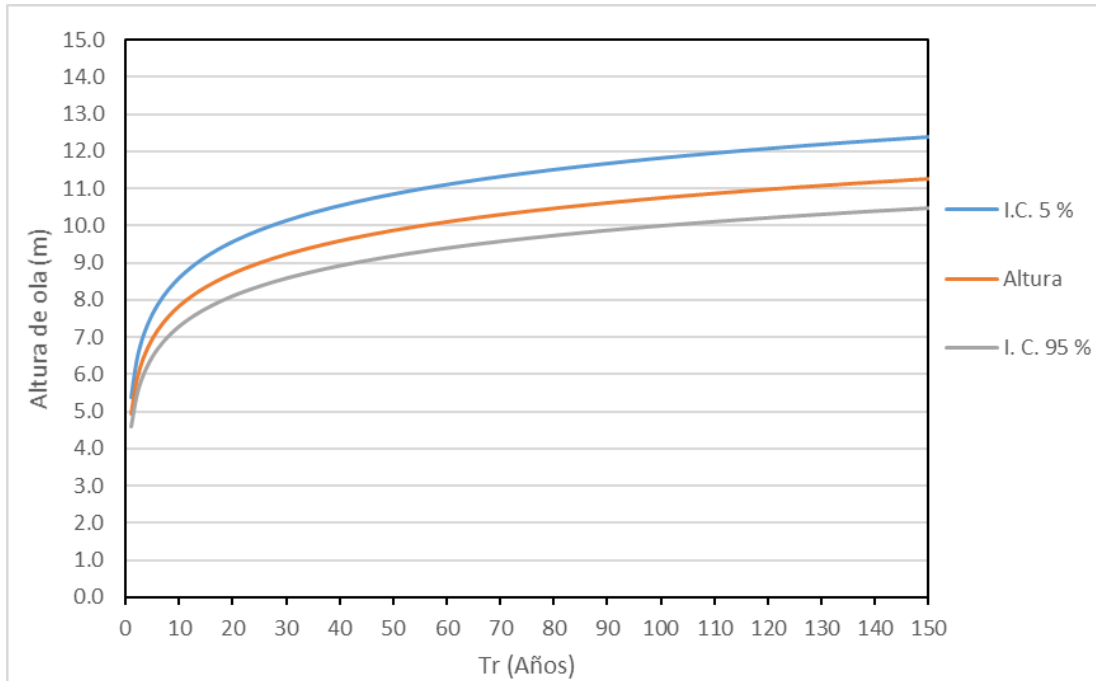


Figura A2.5 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 05

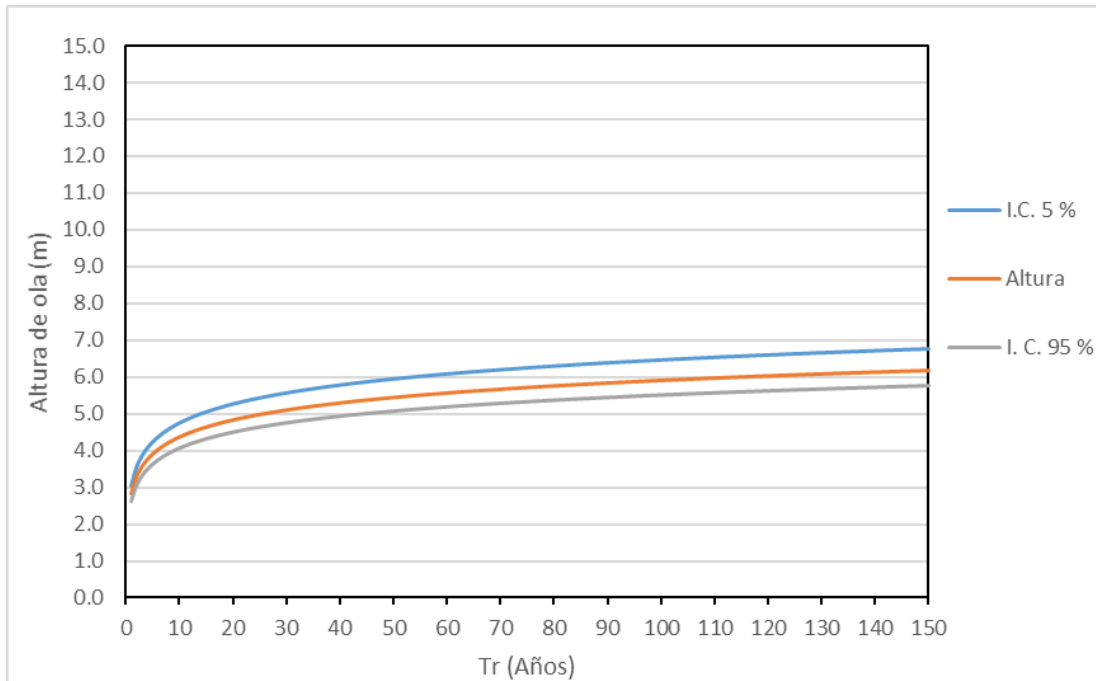


Figura A2.6 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 06

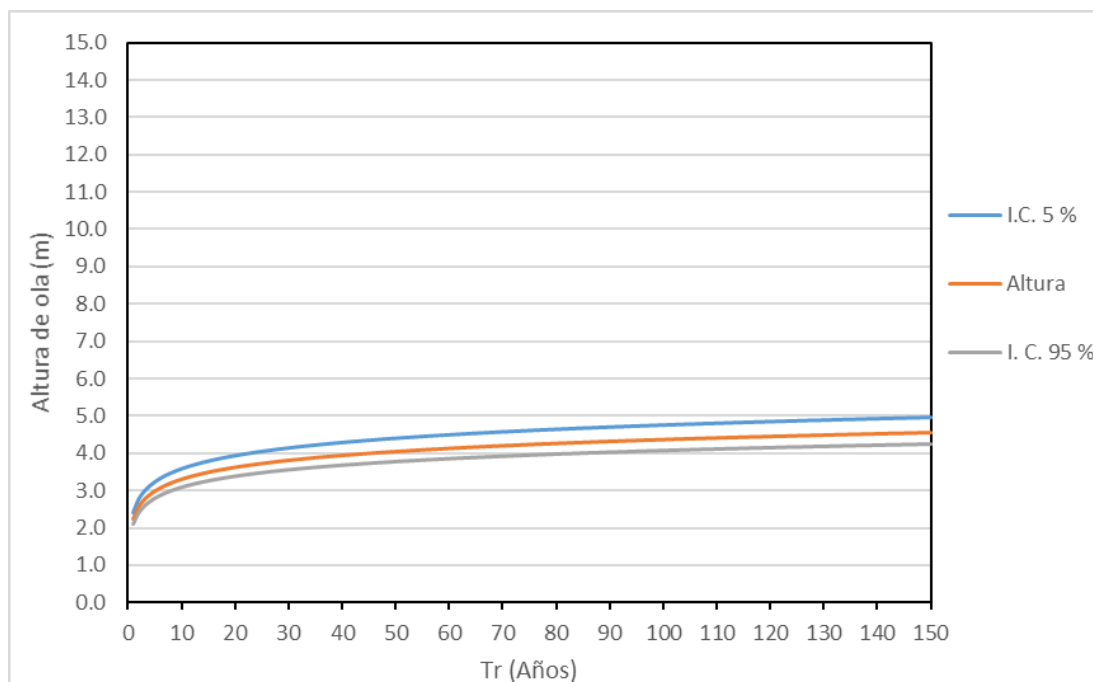


Figura A2.7 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 07

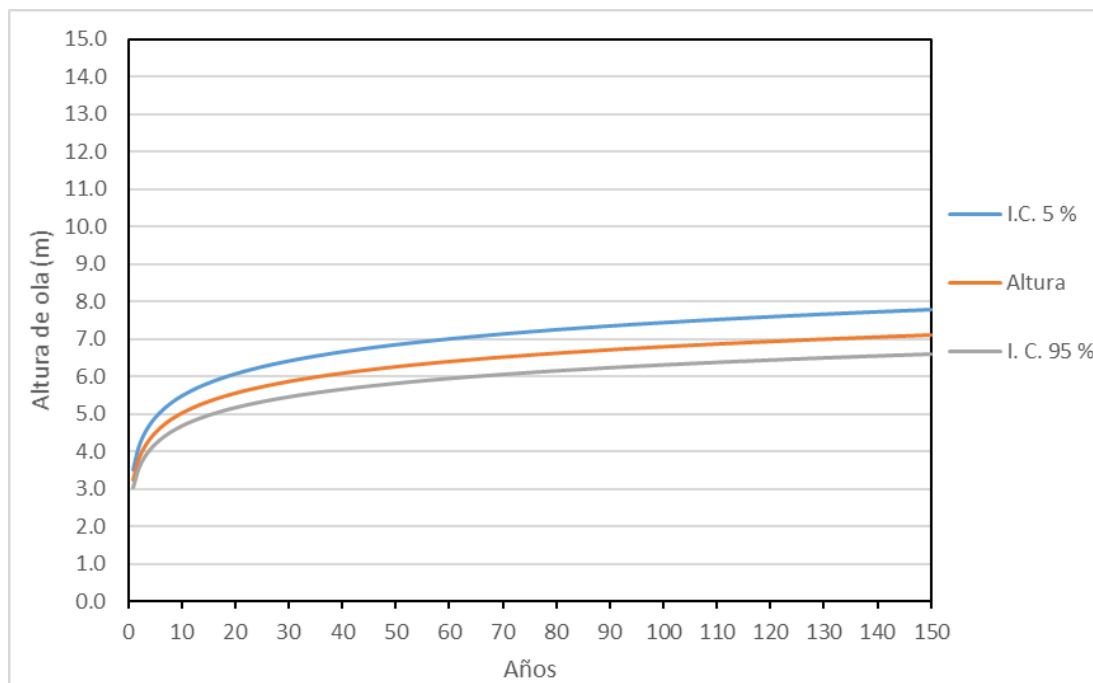


Figura A2.8 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 08

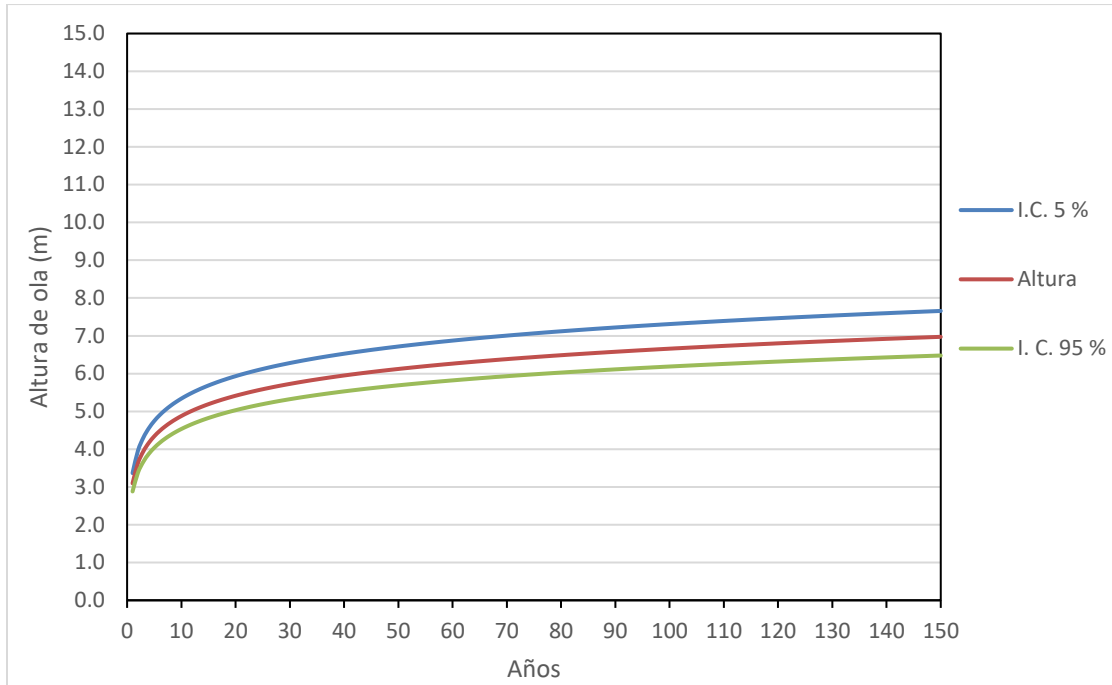


Figura A2.9 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 09

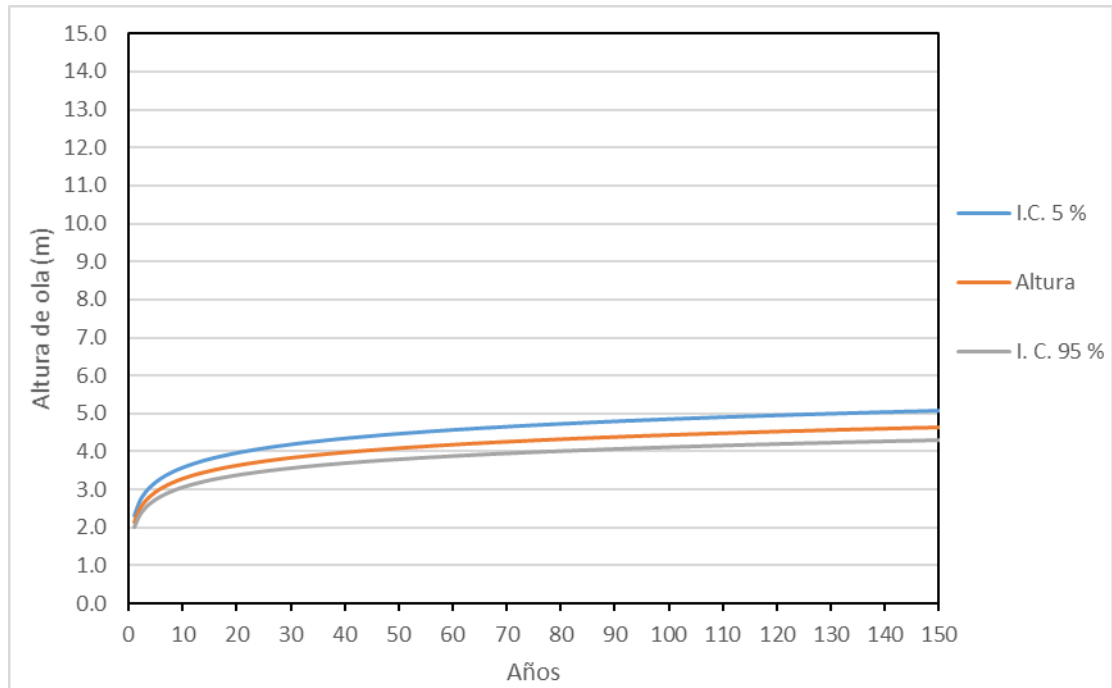


Figura A2.10 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución exponencial en el punto 10

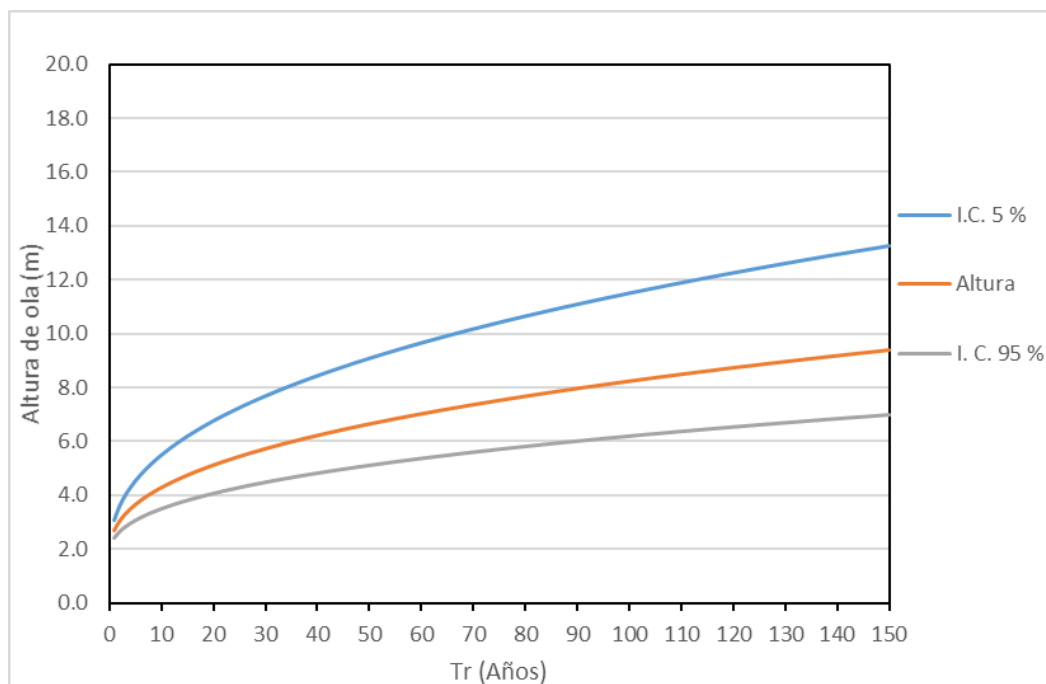


Figura A2.11 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $K = 2.5$ en el punto 01

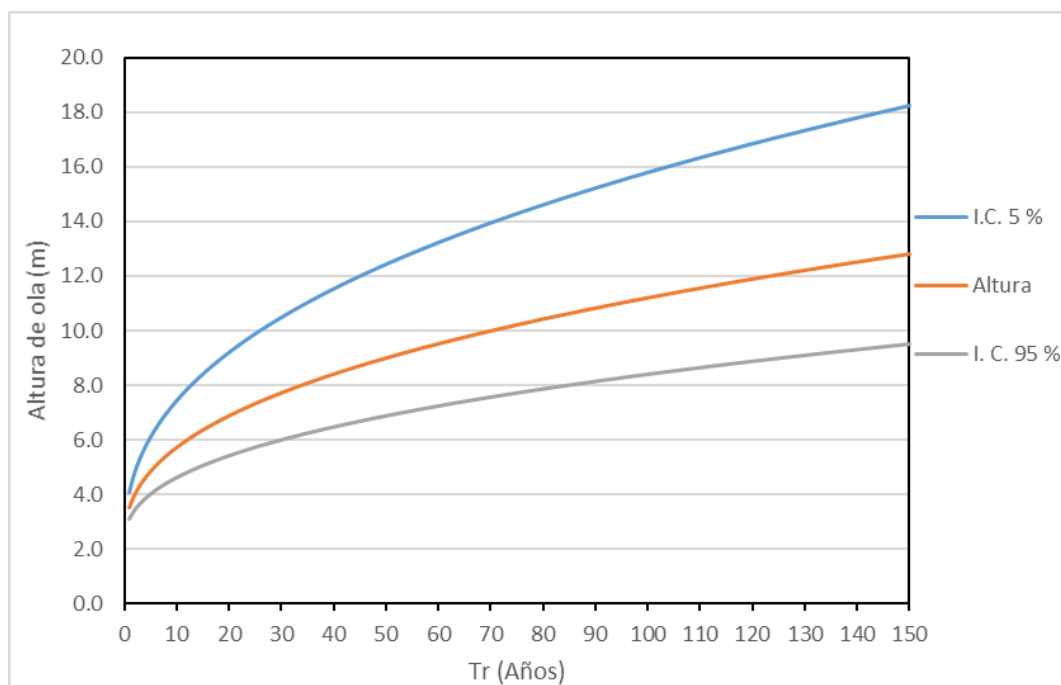


Figura A2.12 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k = 2.5$ en el punto 02

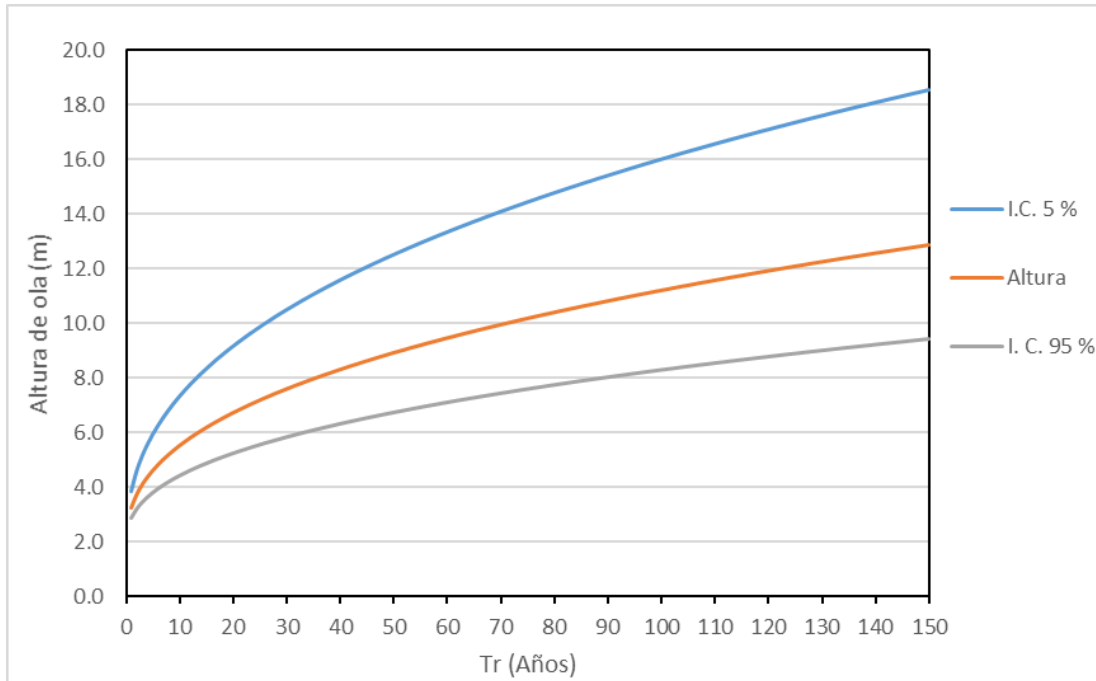


Figura A2.13 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 2.5$ en el punto 03

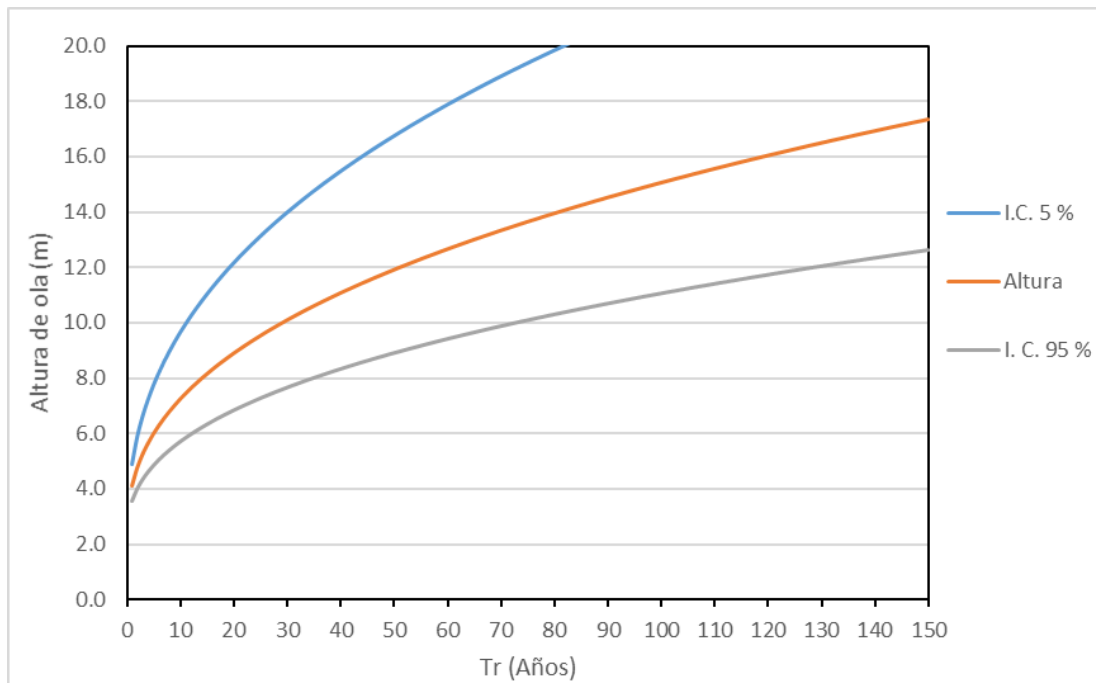


Figura A2.14 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 2.5$ en el punto 04

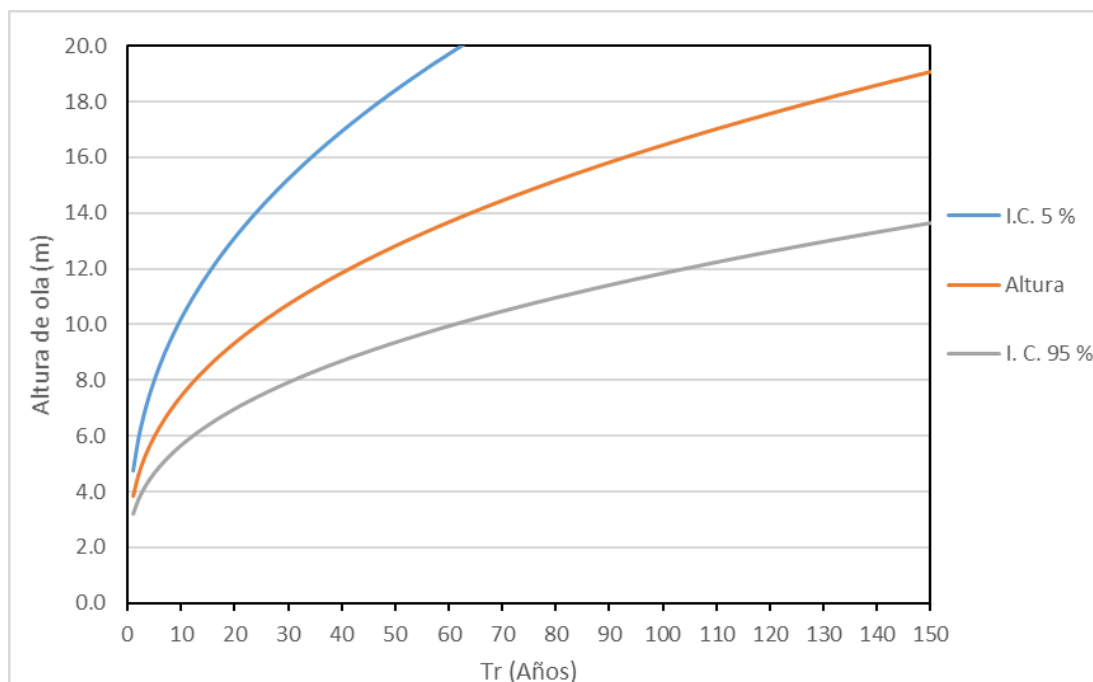


Figura A2.15 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 2.5$ en el punto 05

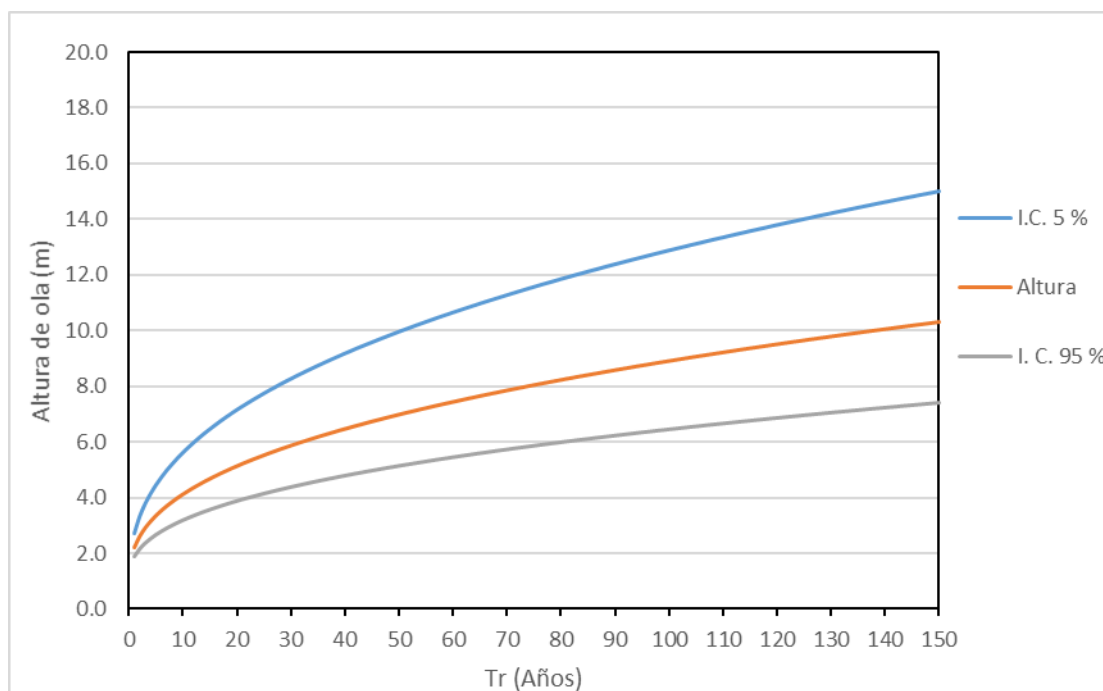


Figura A2.16 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 2.5$ en el punto 6

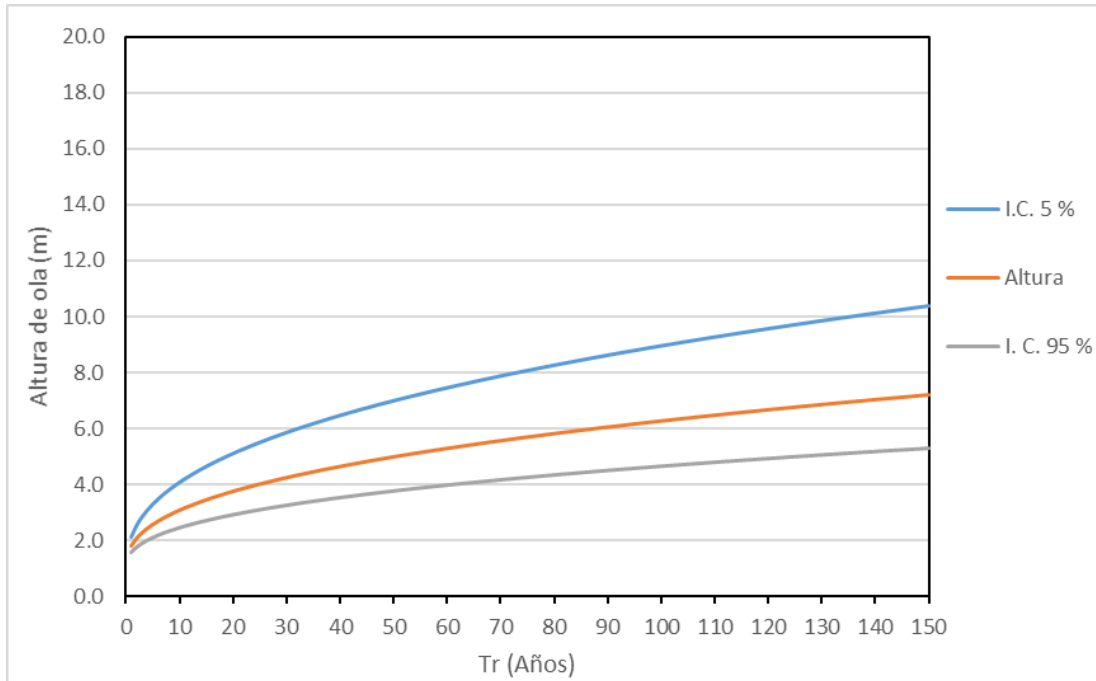


Figura A2.17 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=2.5$ en el punto 7

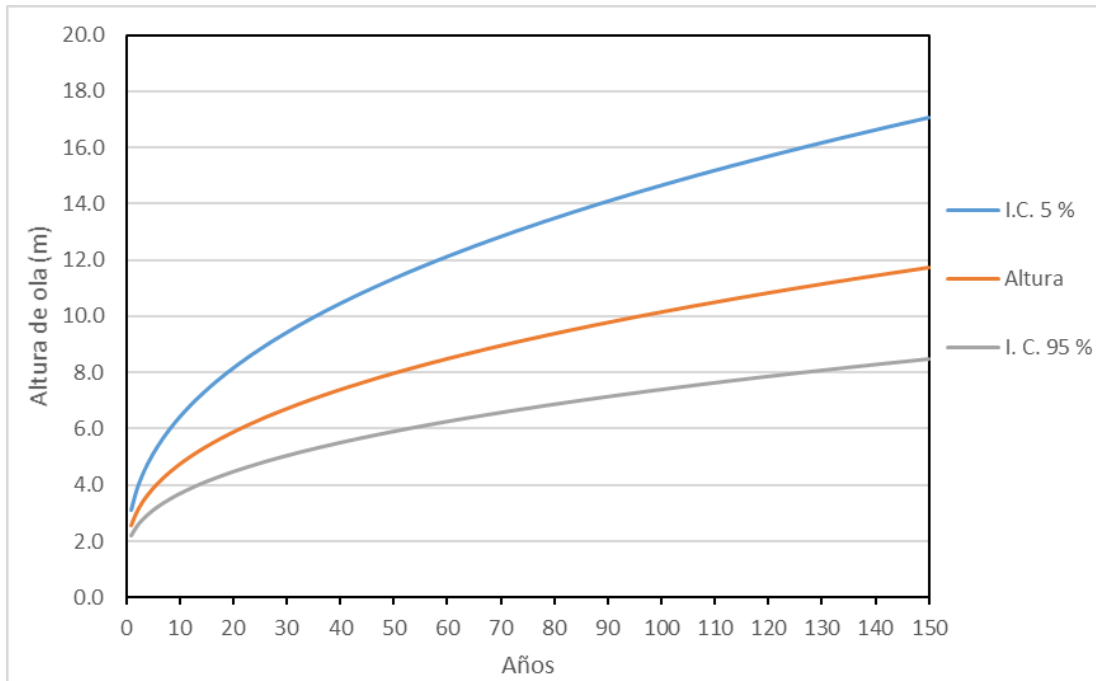


Figura A2.18 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=2.5$ en el punto 8

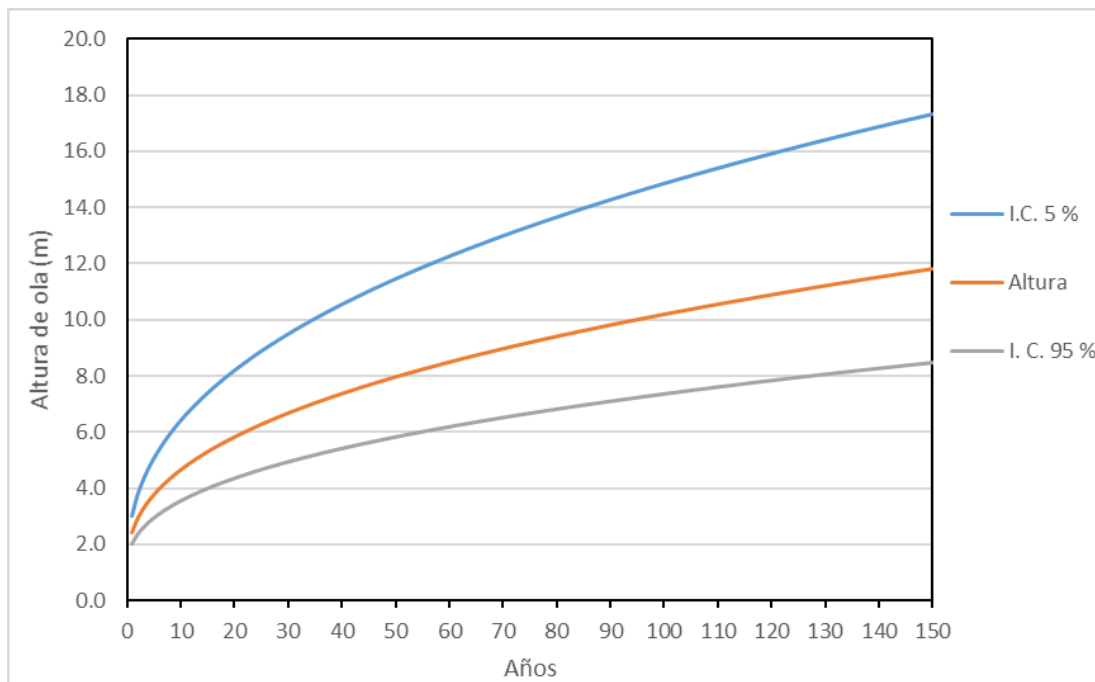


Figura A2.19 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 2.5$ en el punto 9

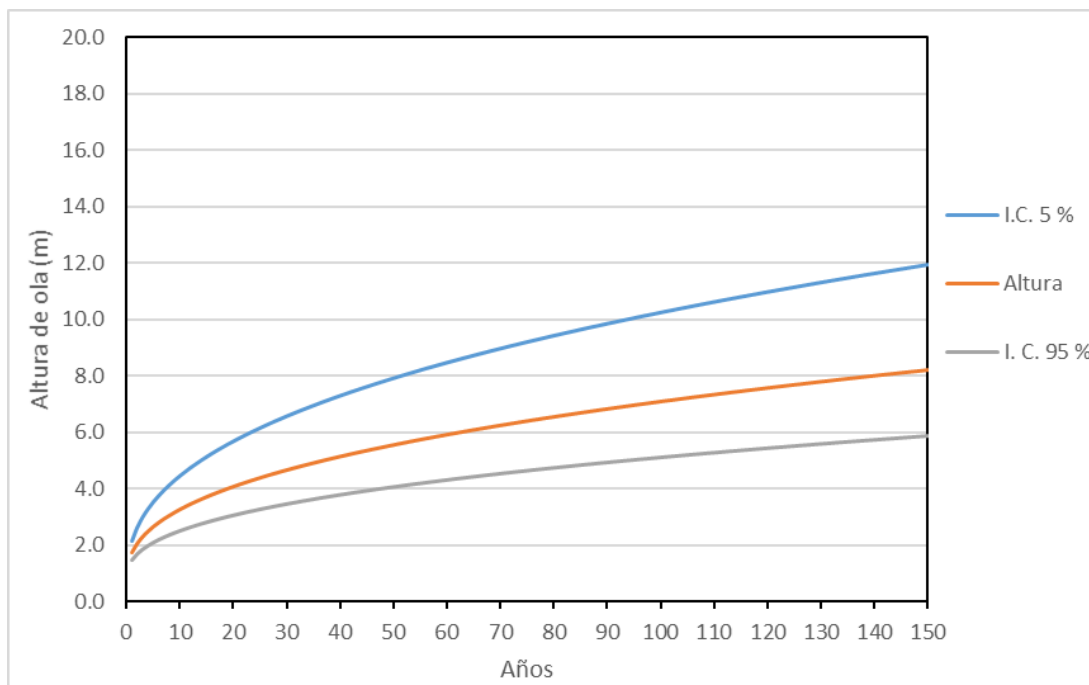


Figura A2.20 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 2.5$ en el punto 10

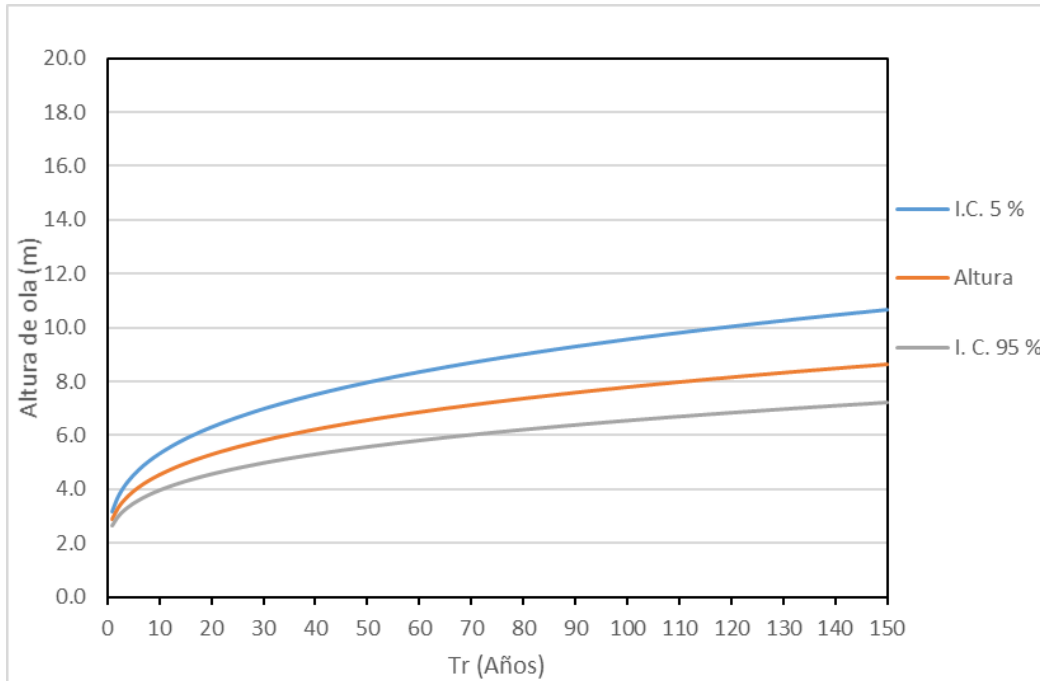


Figura A2.21 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=3.3$ en el punto 01

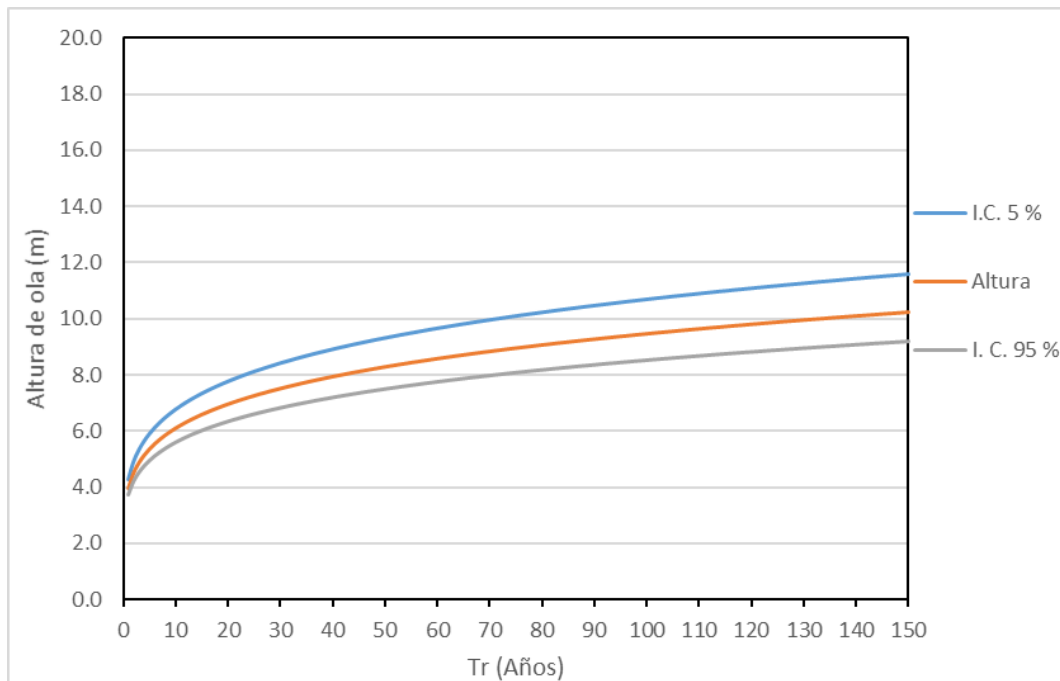


Figura A2.22 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=3.3$ en el punto 02

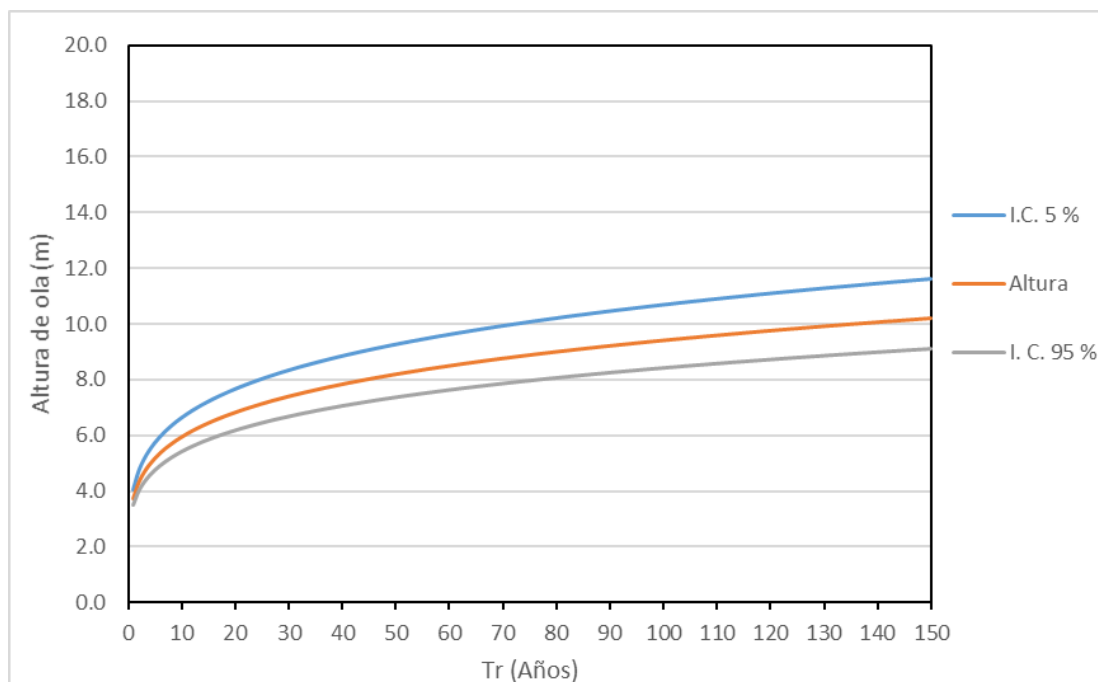


Figura A2.23 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 3.3$ en el punto 03

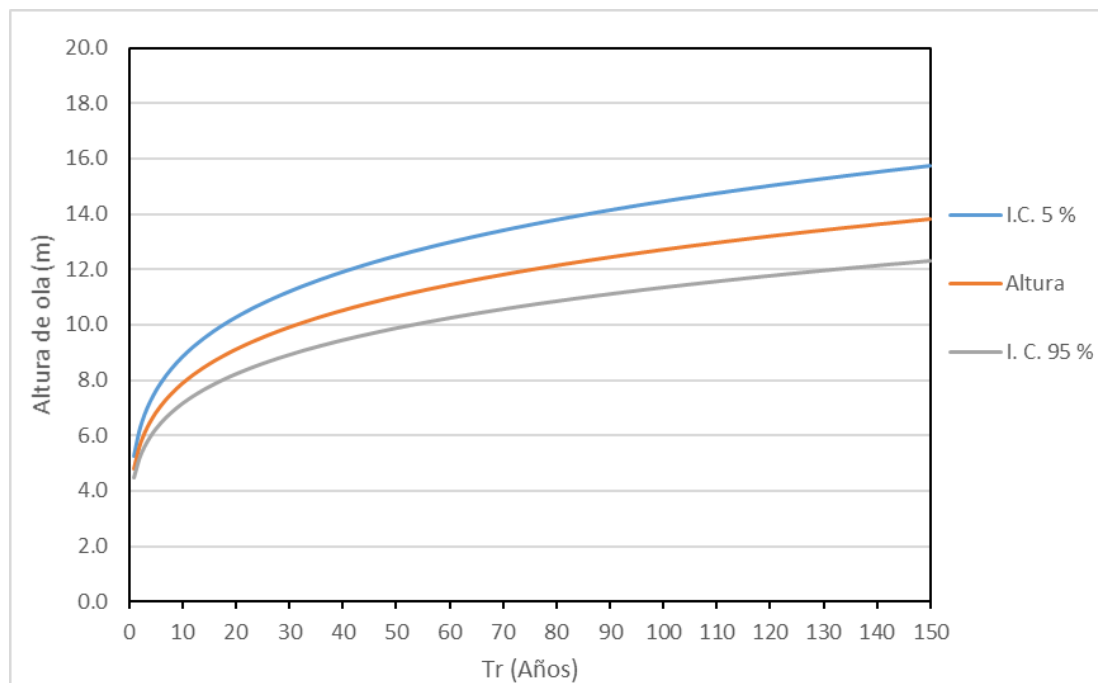


Figura A2.24 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 3.3$ en el punto 04

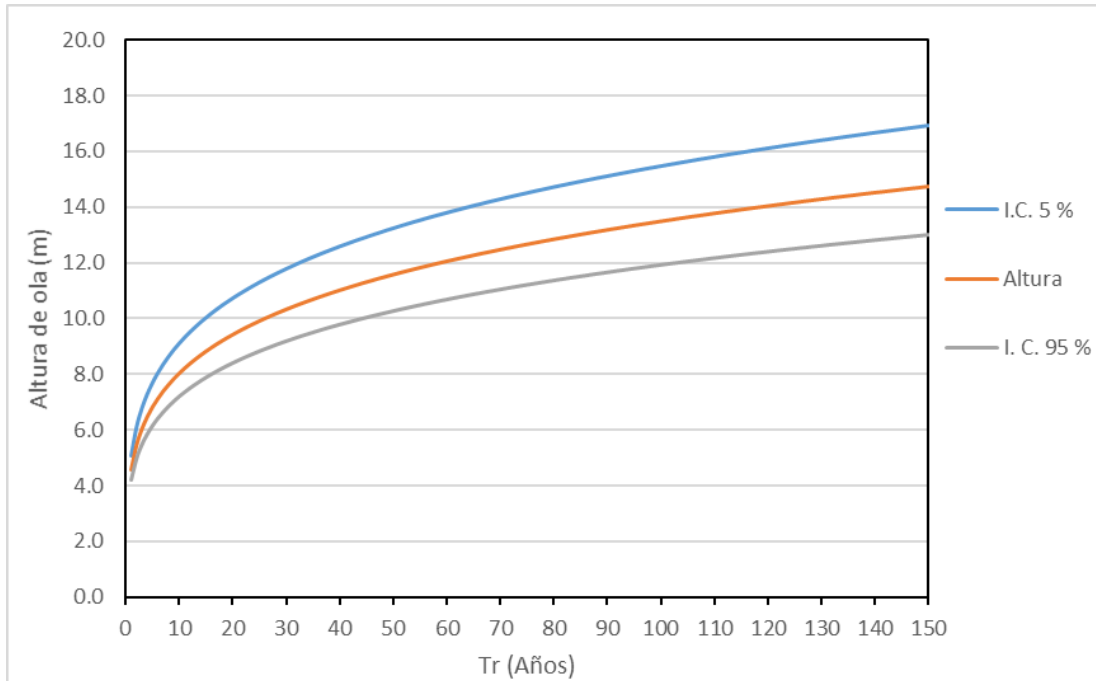


Figura A2.25 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 3.3$ en el punto 05

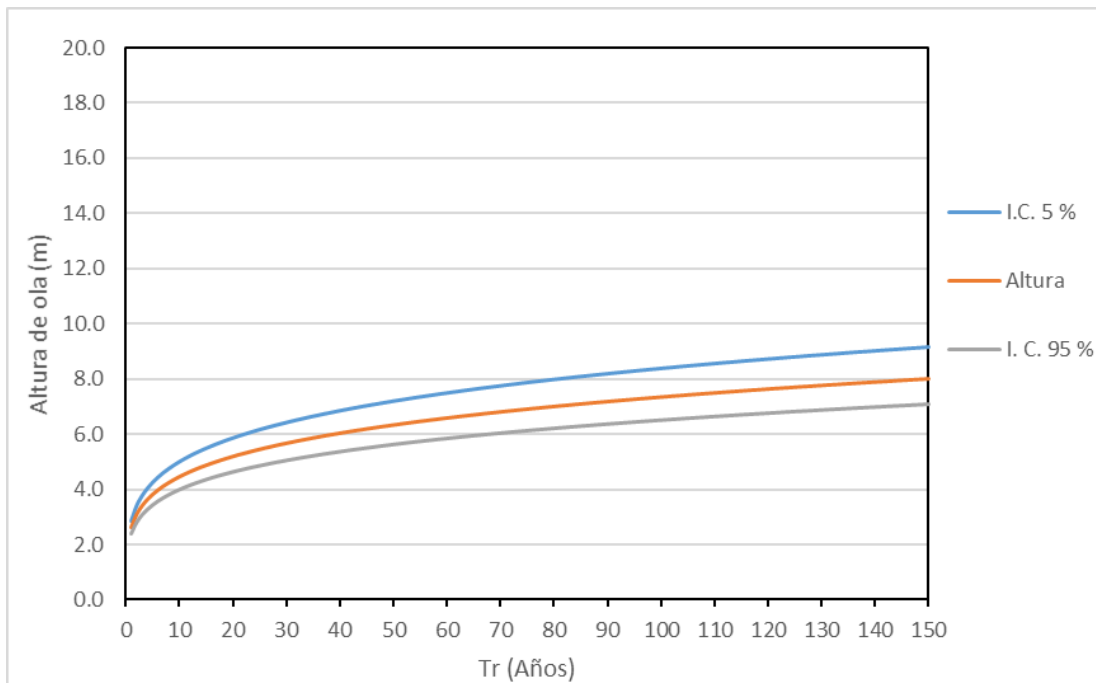


Figura A2.26 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 3.3$ en el punto 06

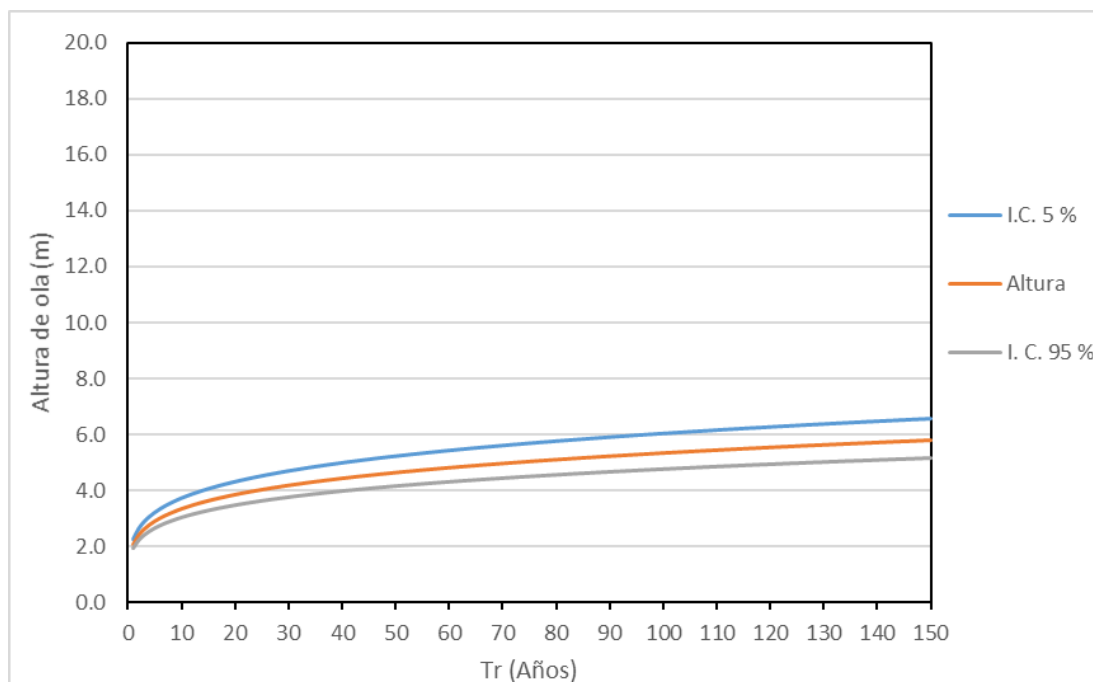


Figura A2.27 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=3.3$ en el punto 07

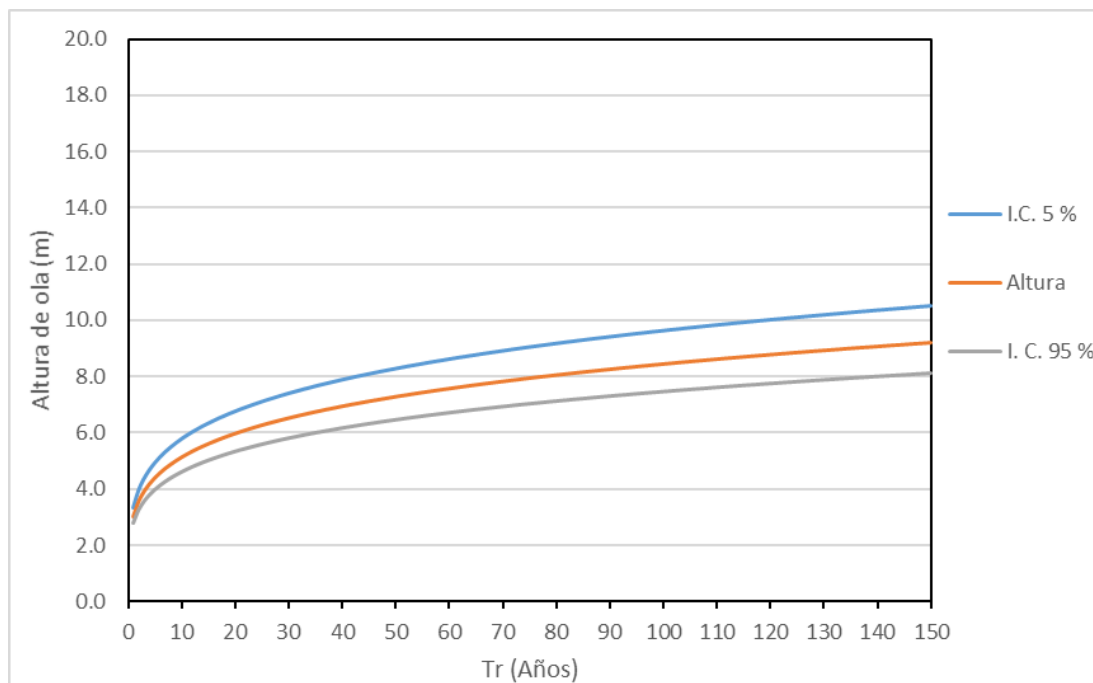


Figura A2.28 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=3.3$ en el punto 08

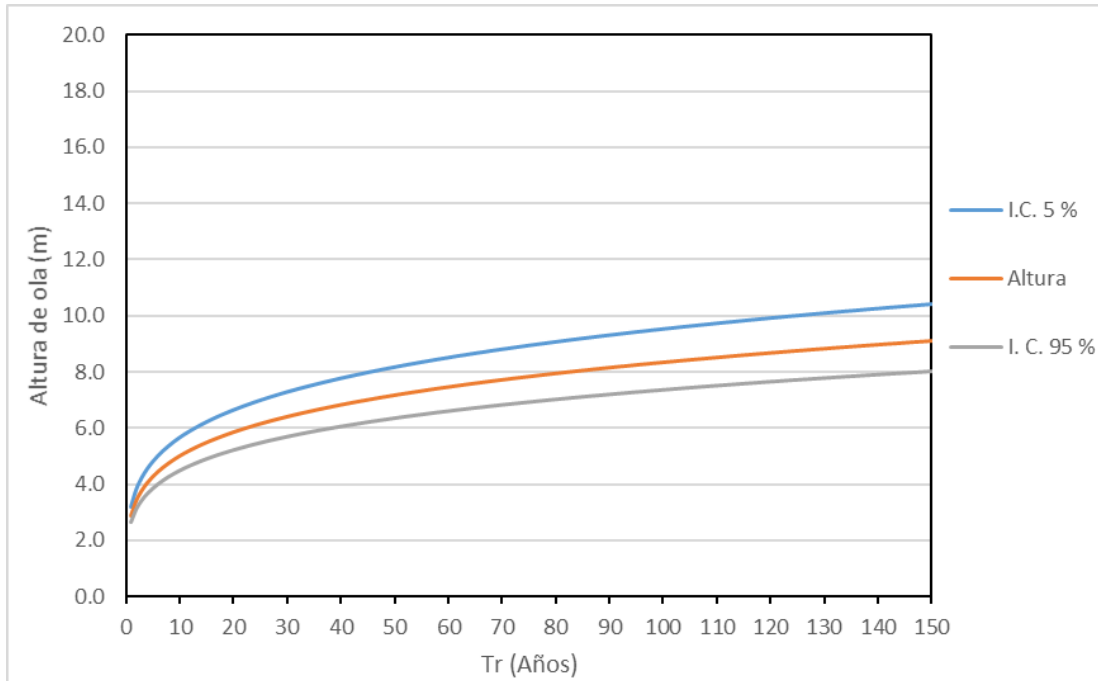


Figura A2.29 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 3.3$ en el punto 09

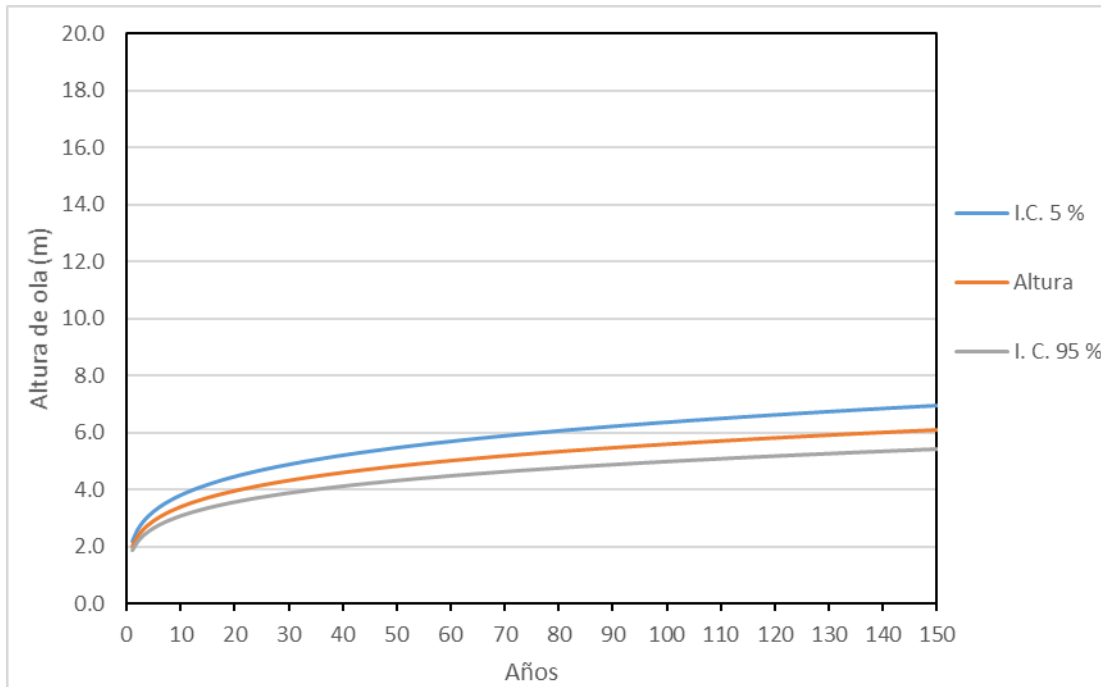


Figura A2.30 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 3.3$ en el punto 10

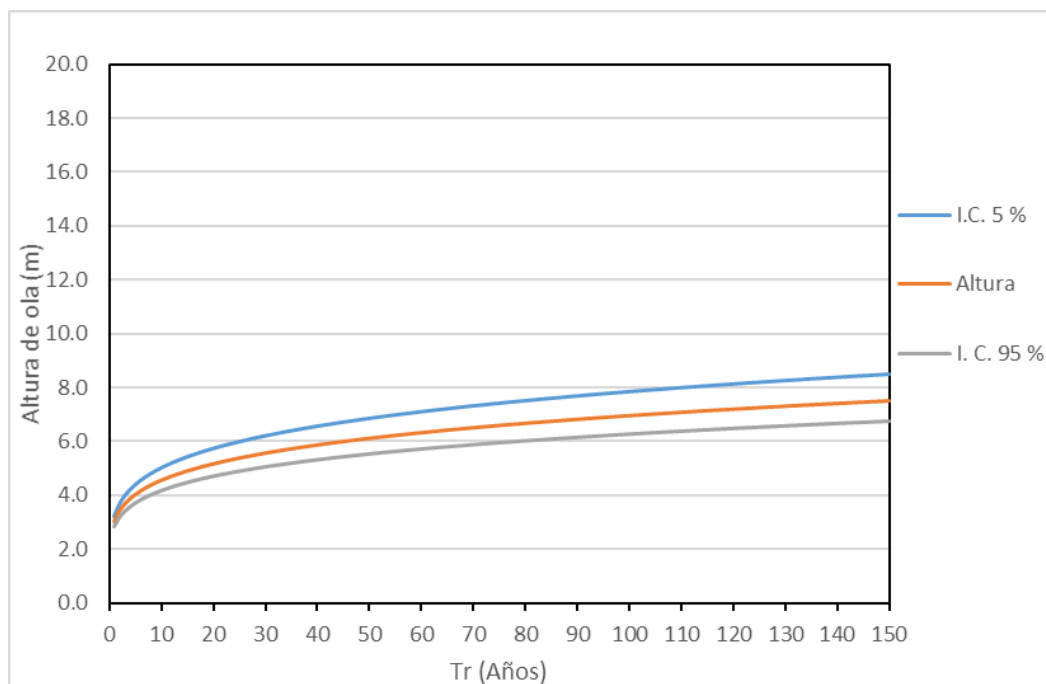


Figura A2.31 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 01

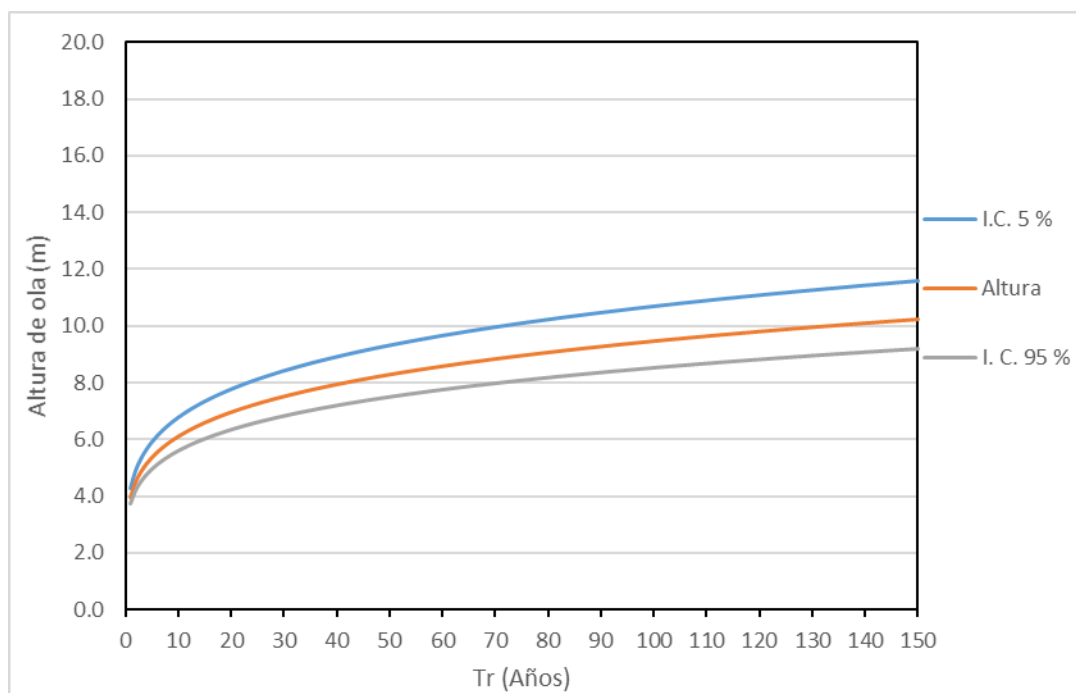


Figura A2.32 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 02

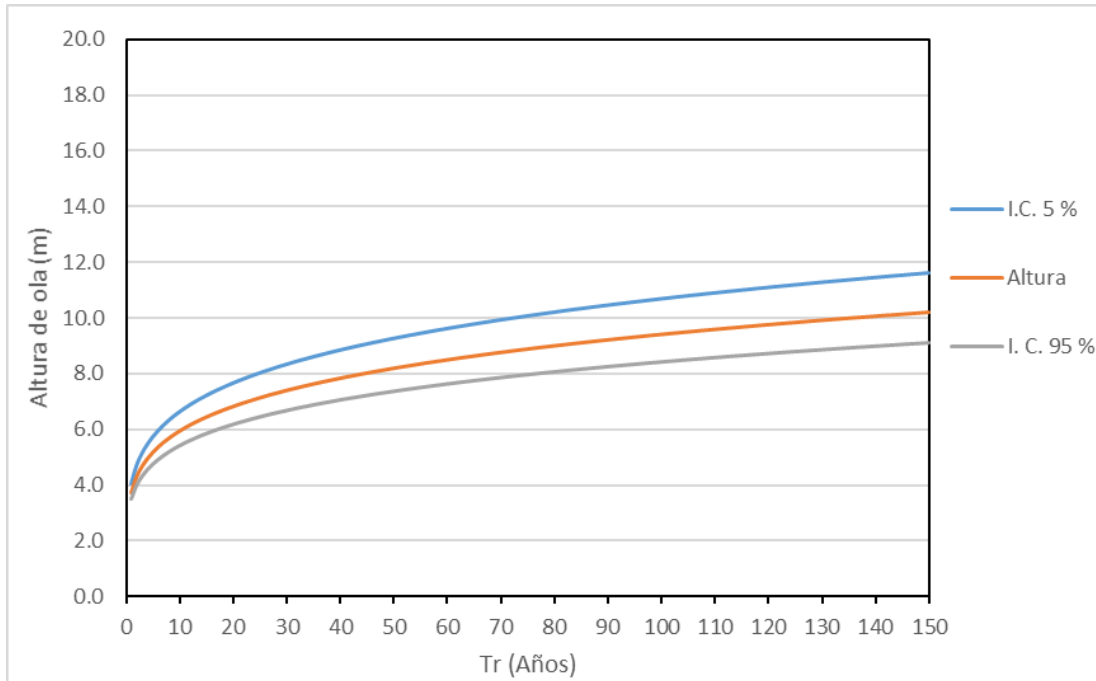


Figura A2.33 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 03

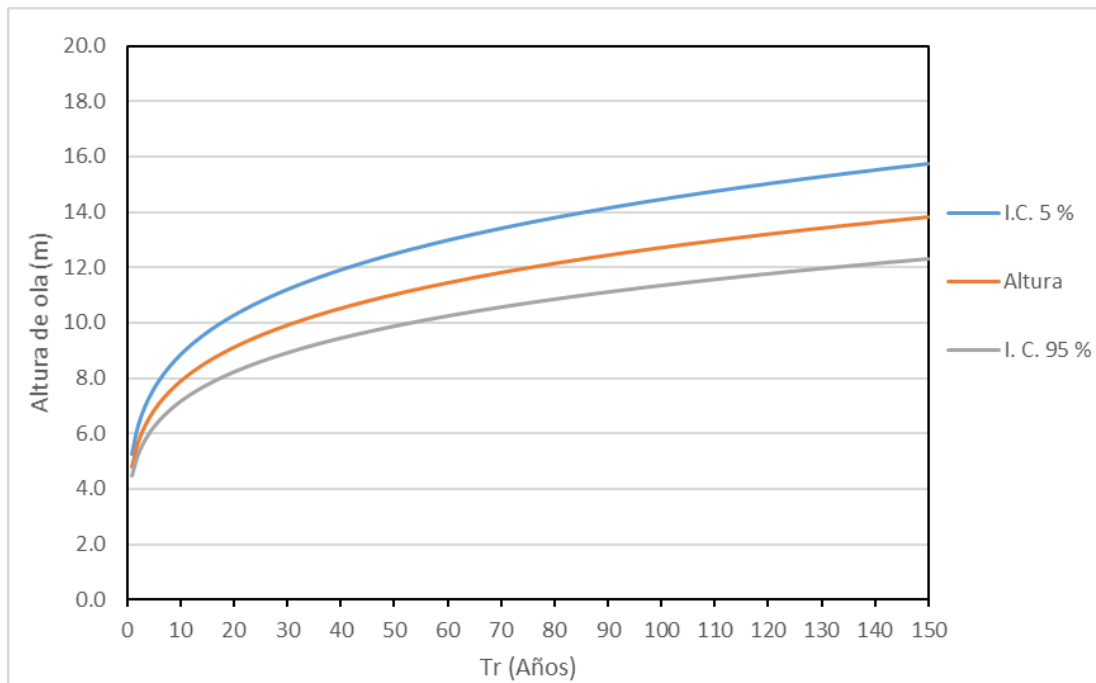


Figura A2.34 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 04

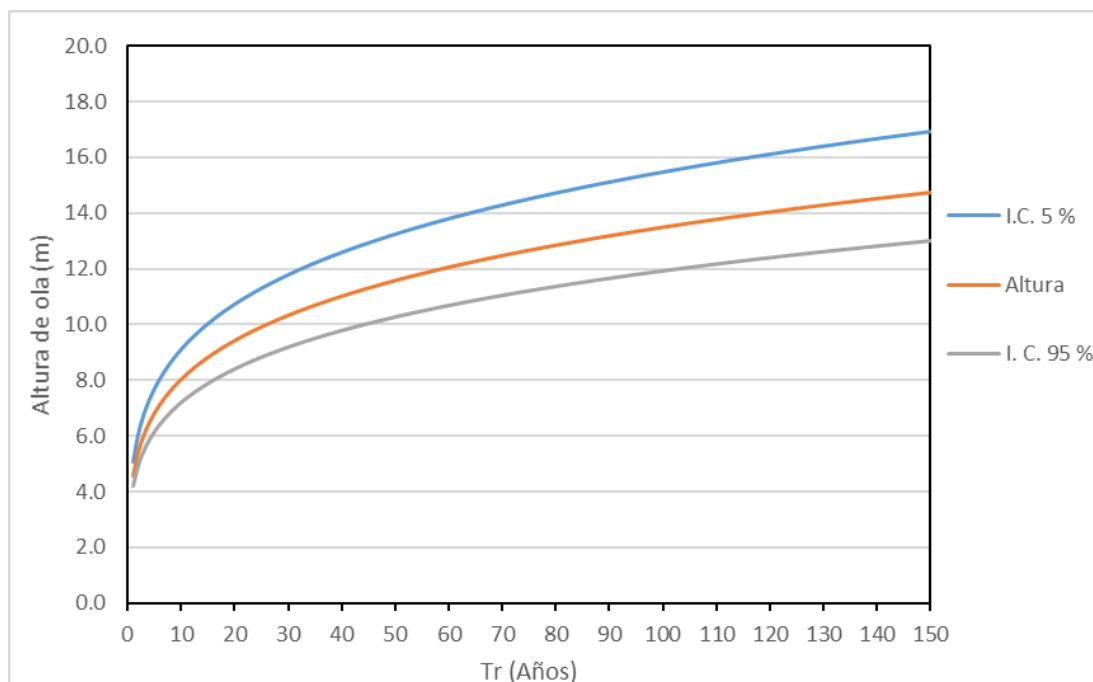


Figura A2.35 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 05

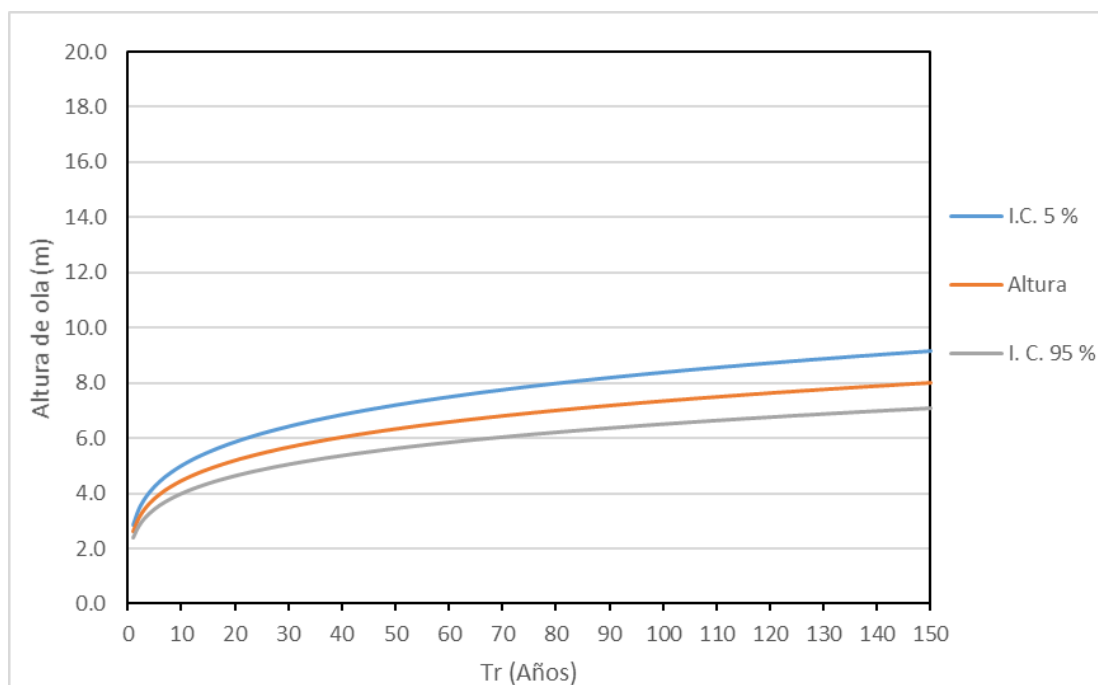


Figura A2.36 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 06

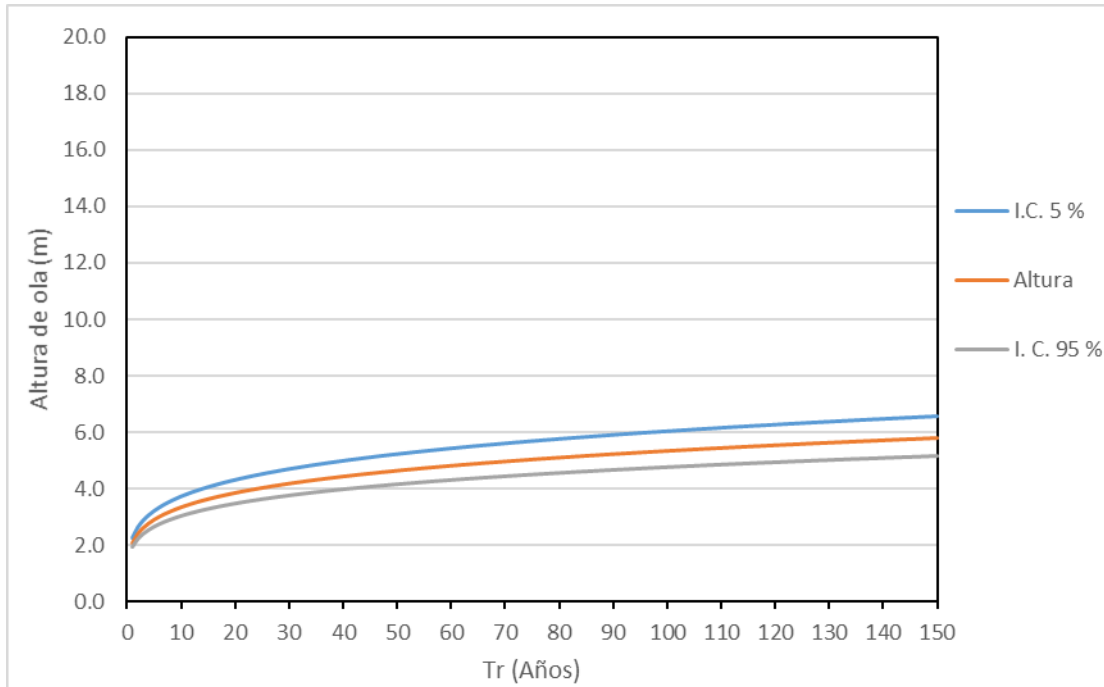


Figura A2.37 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 07

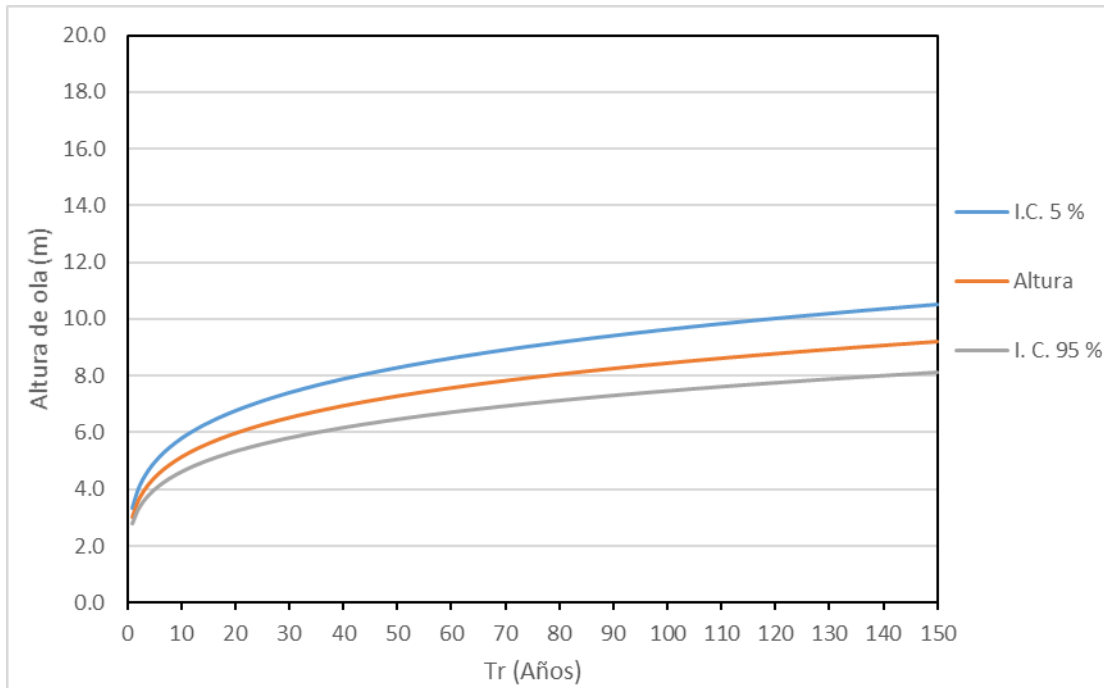


Figura A2.38 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 08

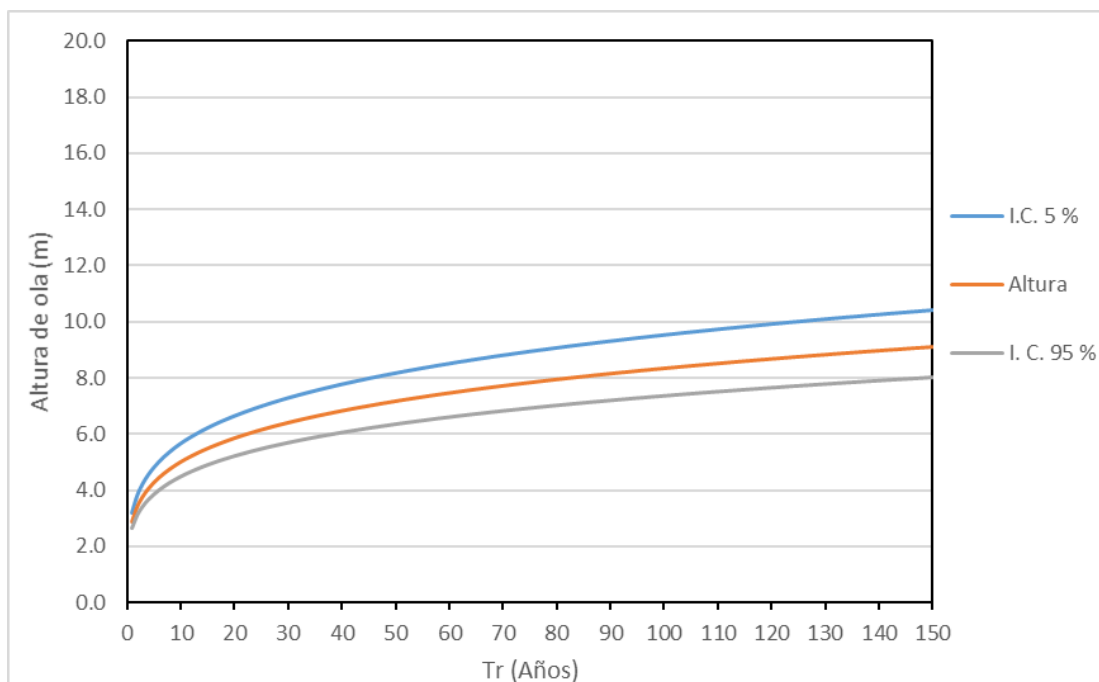


Figura A2.39 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 09

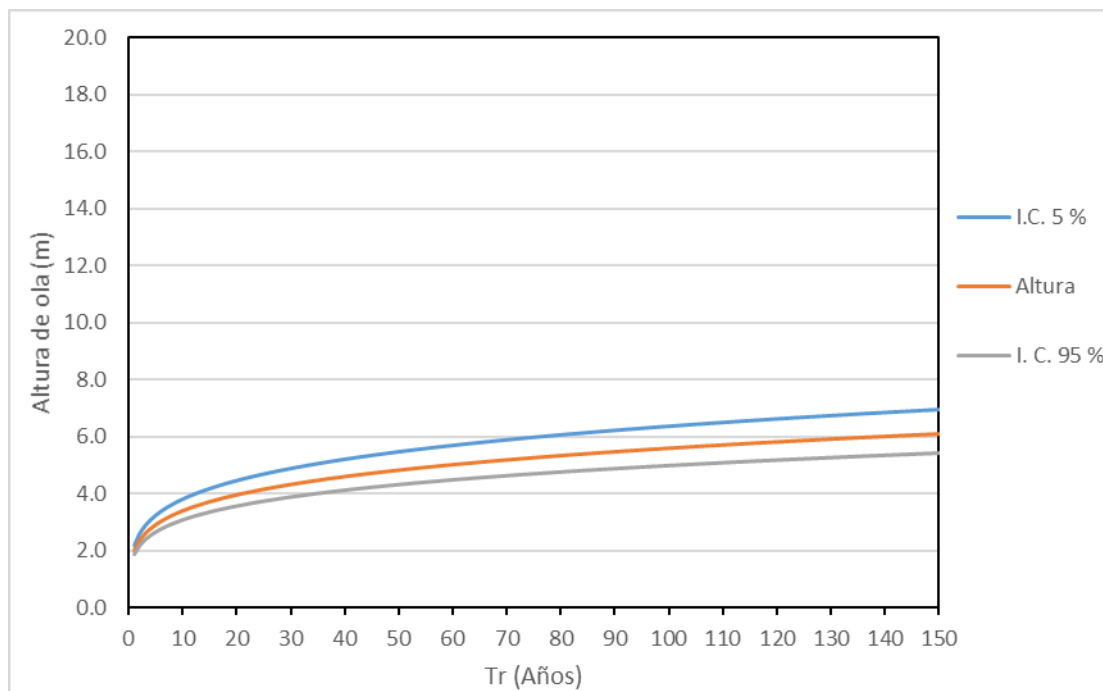


Figura A2.40 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 5.0$ en el punto 10

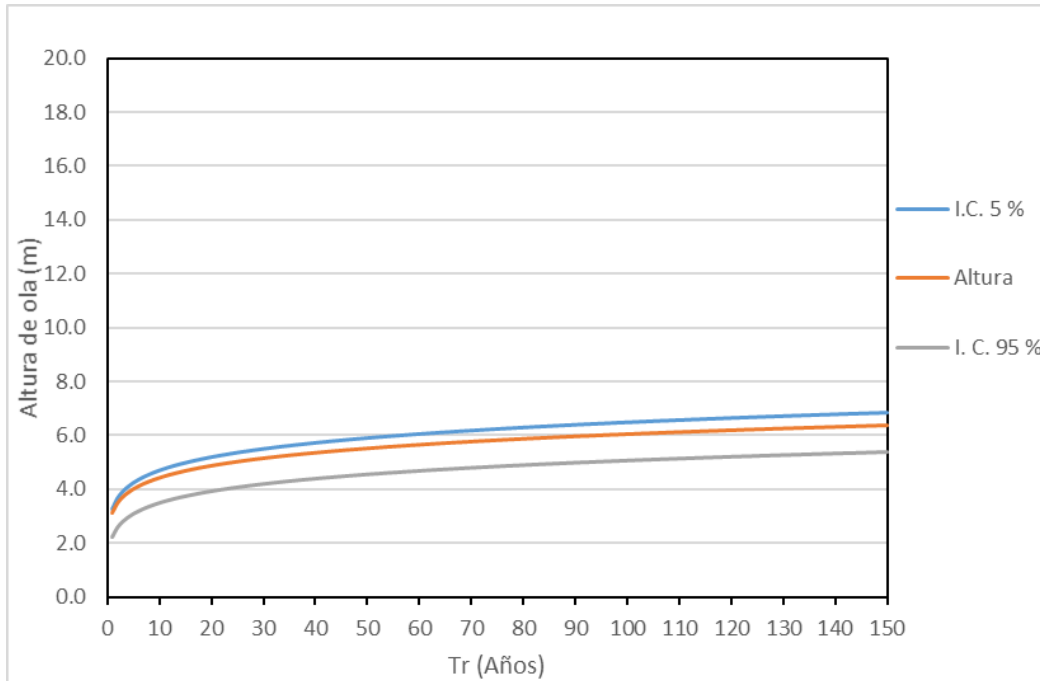


Figura A2.41 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 10.0$ en el punto 01

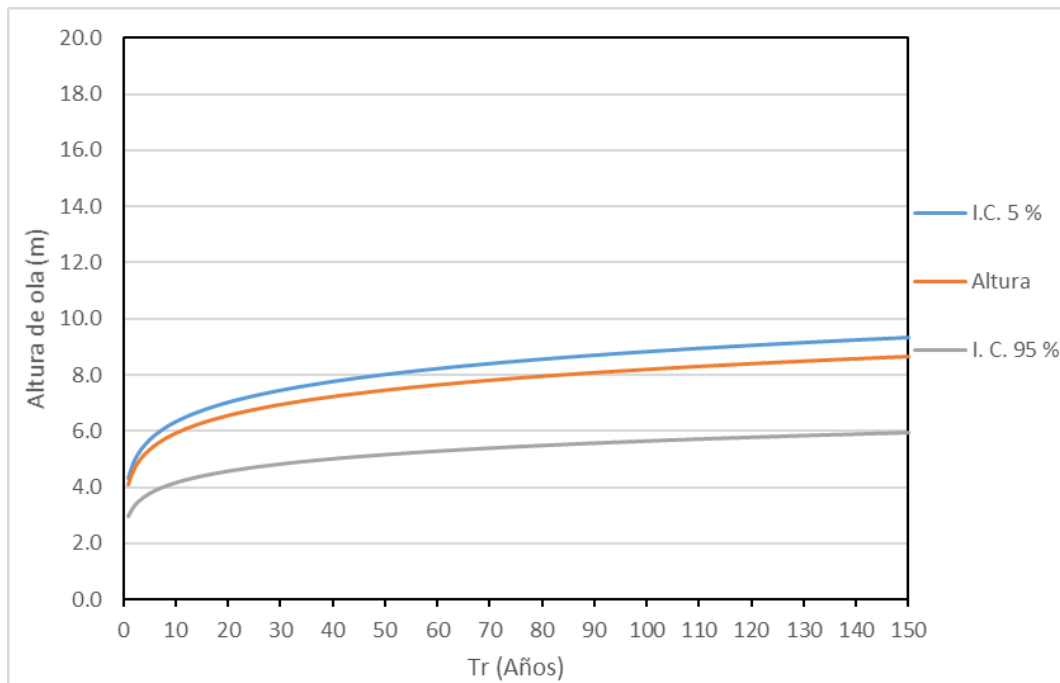


Figura A2.42 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 10.0$ en el punto 02

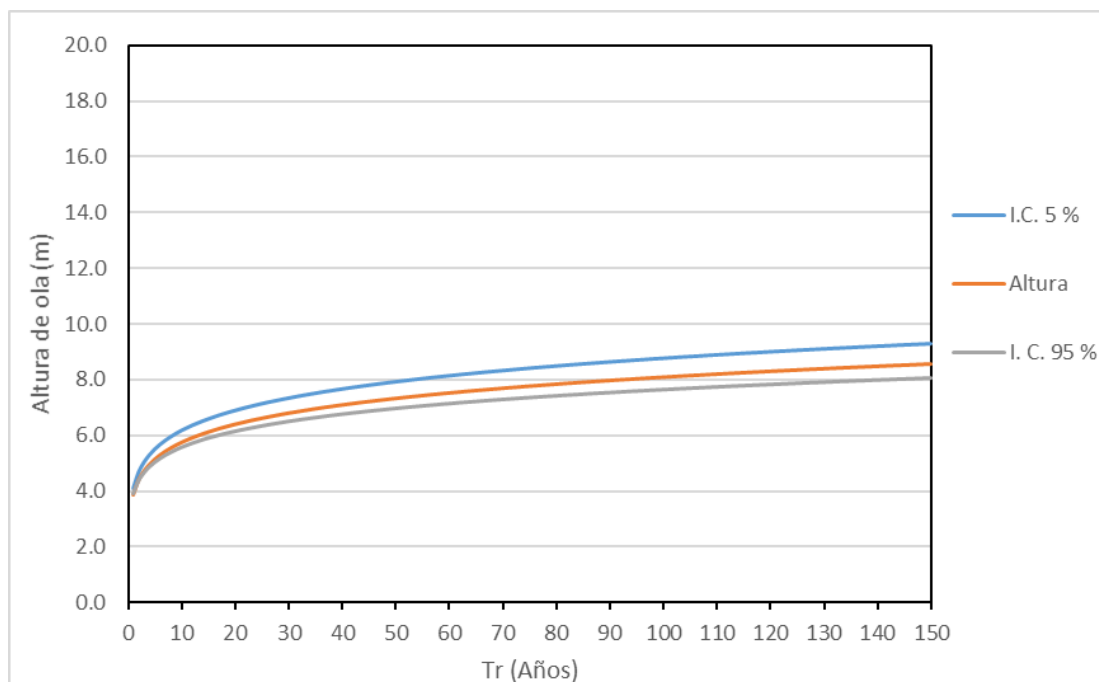


Figura A2.43 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=10.0$ en el punto 03

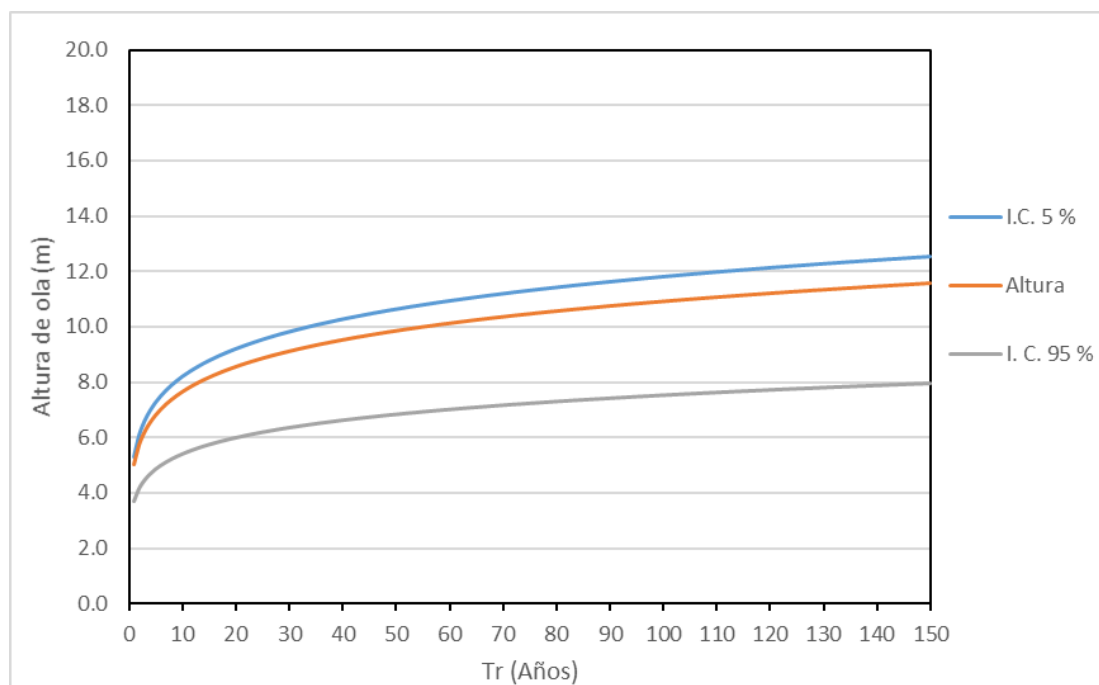


Figura A2.44 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k=10.0$ en el punto 04

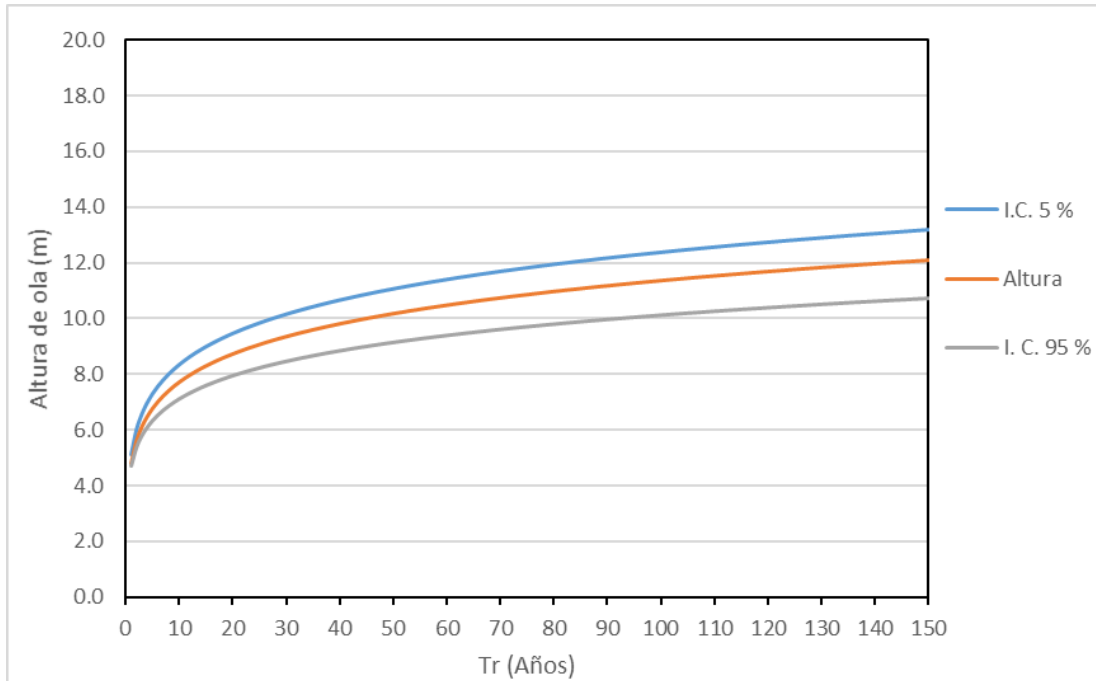


Figura A2.45 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 10.0$ en el punto 05

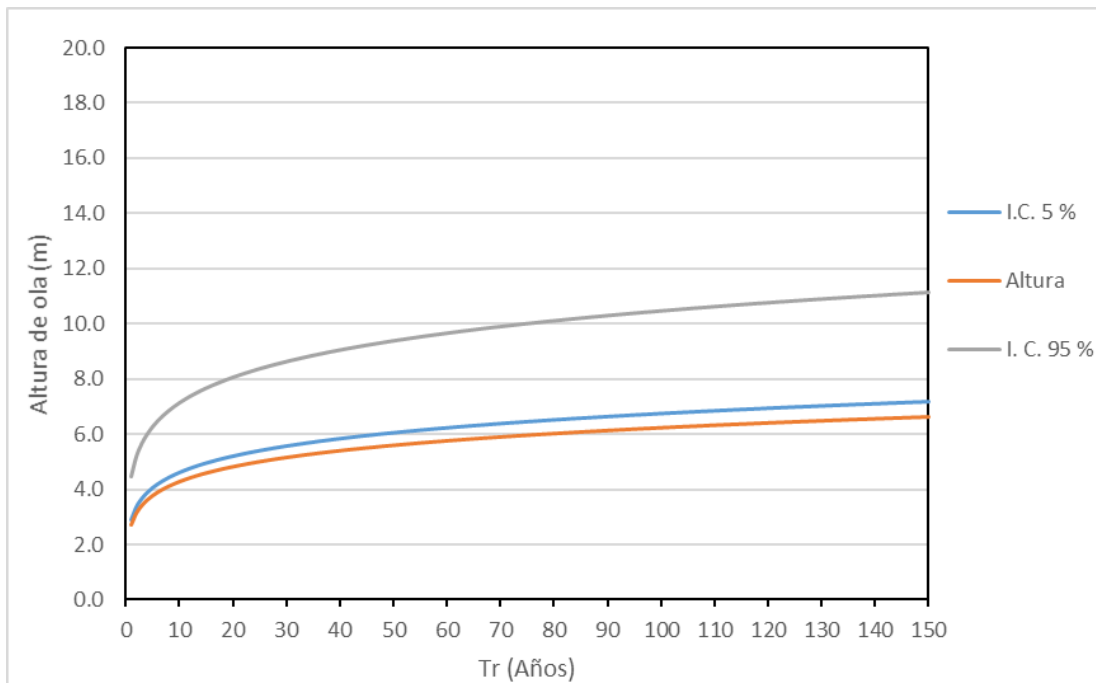


Figura A2.46 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 10.0$ en el punto 06

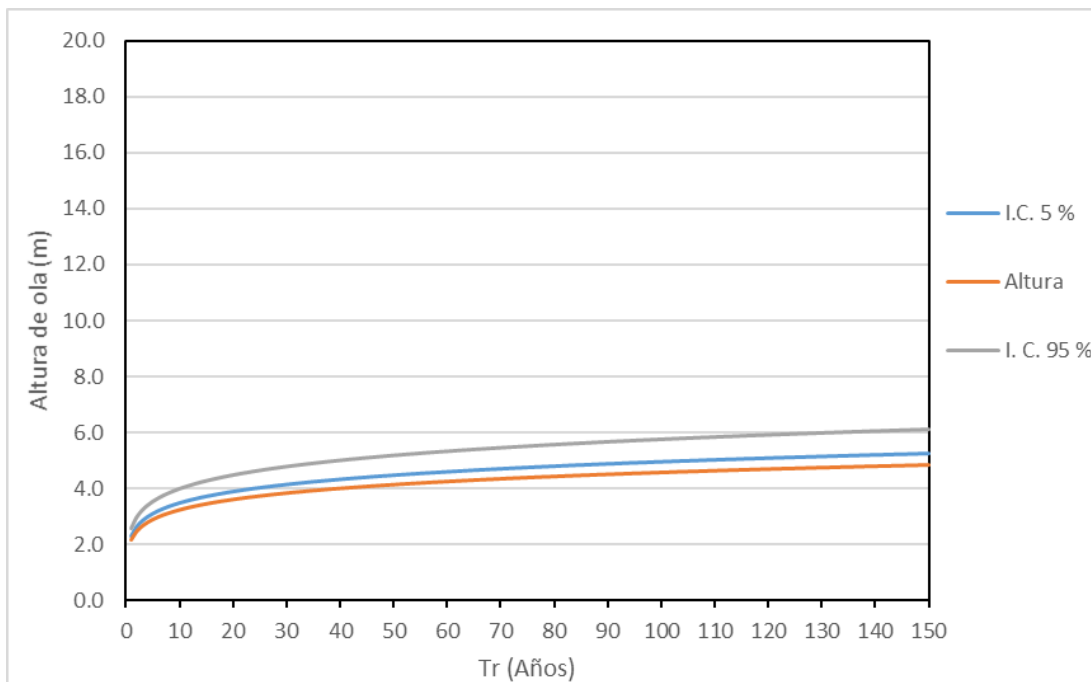


Figura A2.47 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 10.0$ en el punto 07

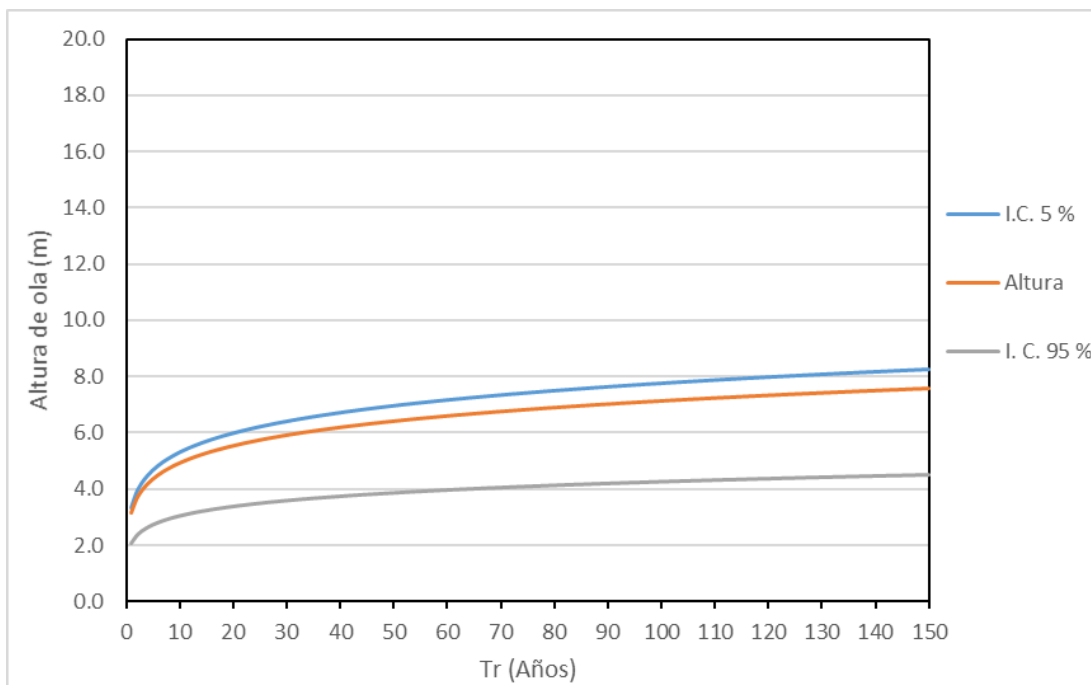


Figura A2.48 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 10.0$ en el punto 08

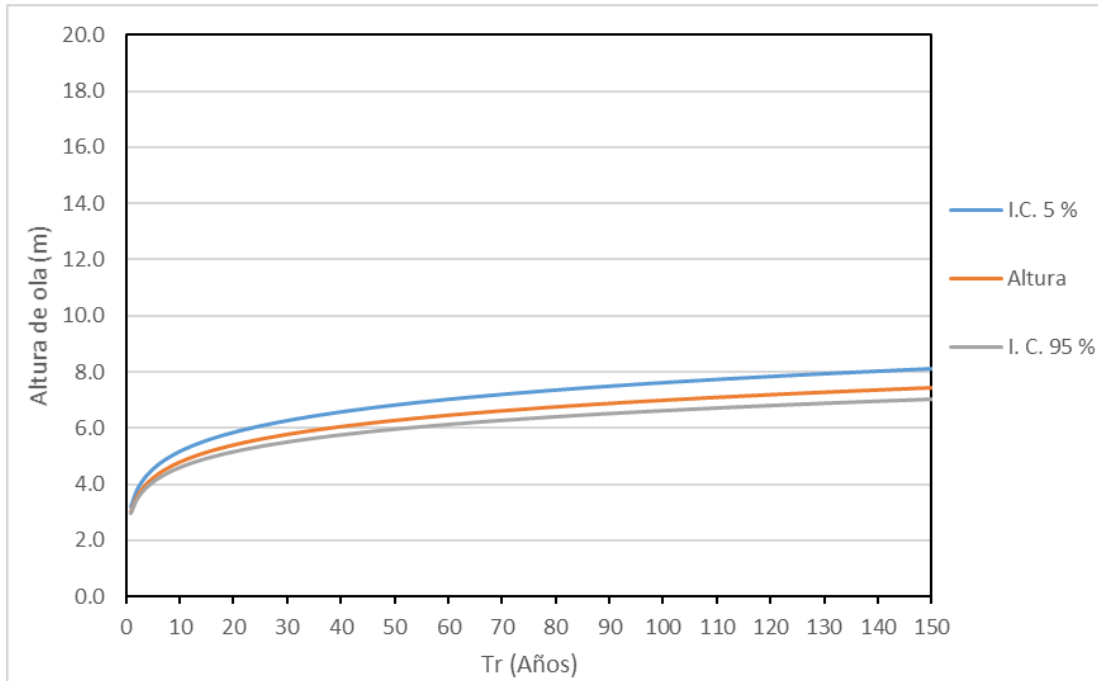


Figura A2.49 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 10.0$ en el punto 09

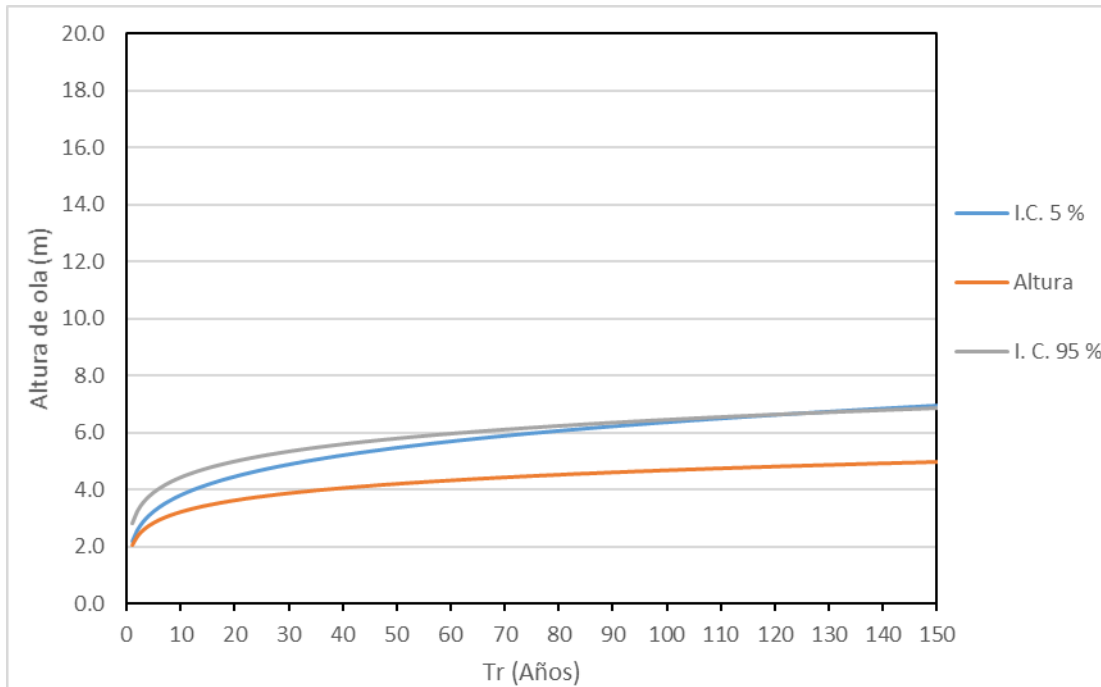


Figura A2.50 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Frechet con $k= 10.0$ en el punto 10

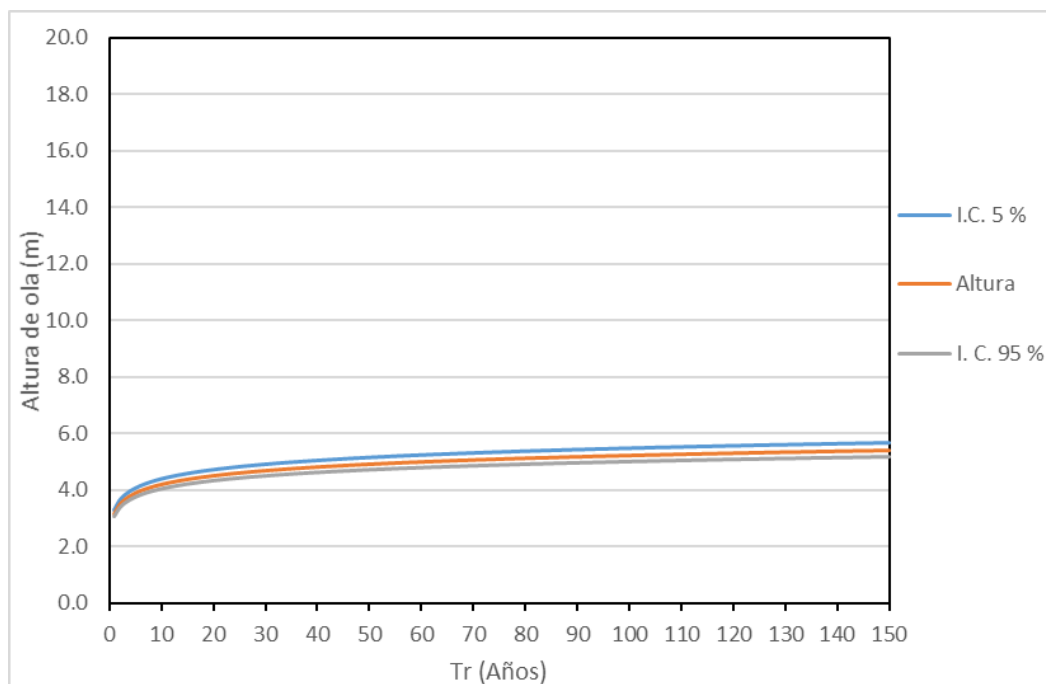


Figura A2.51 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 01

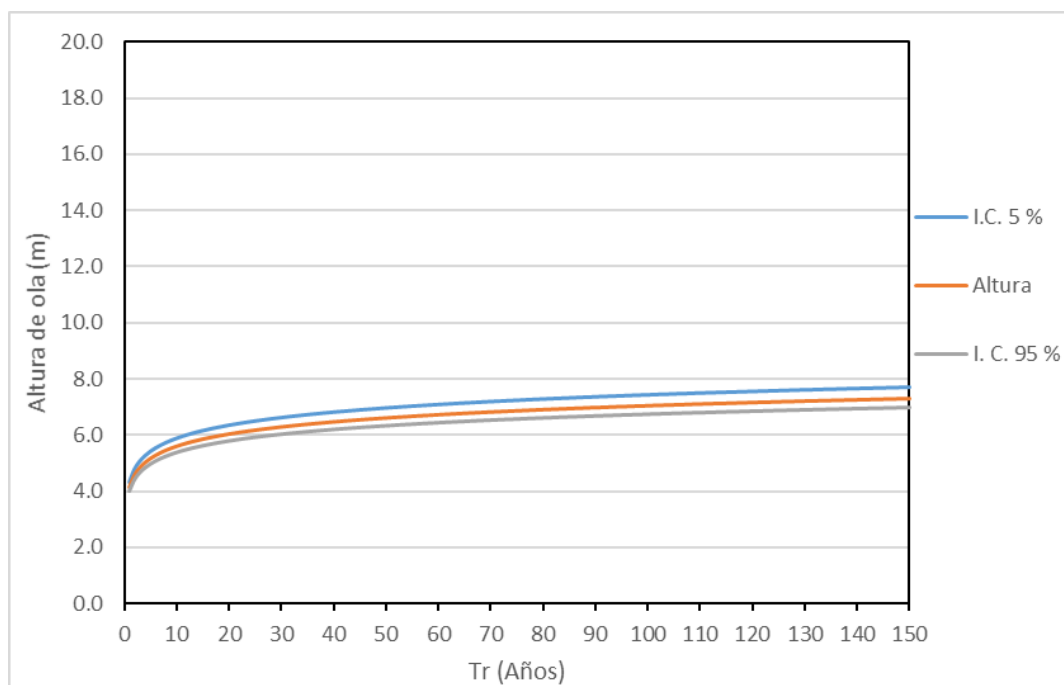


Figura A2.52 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 02

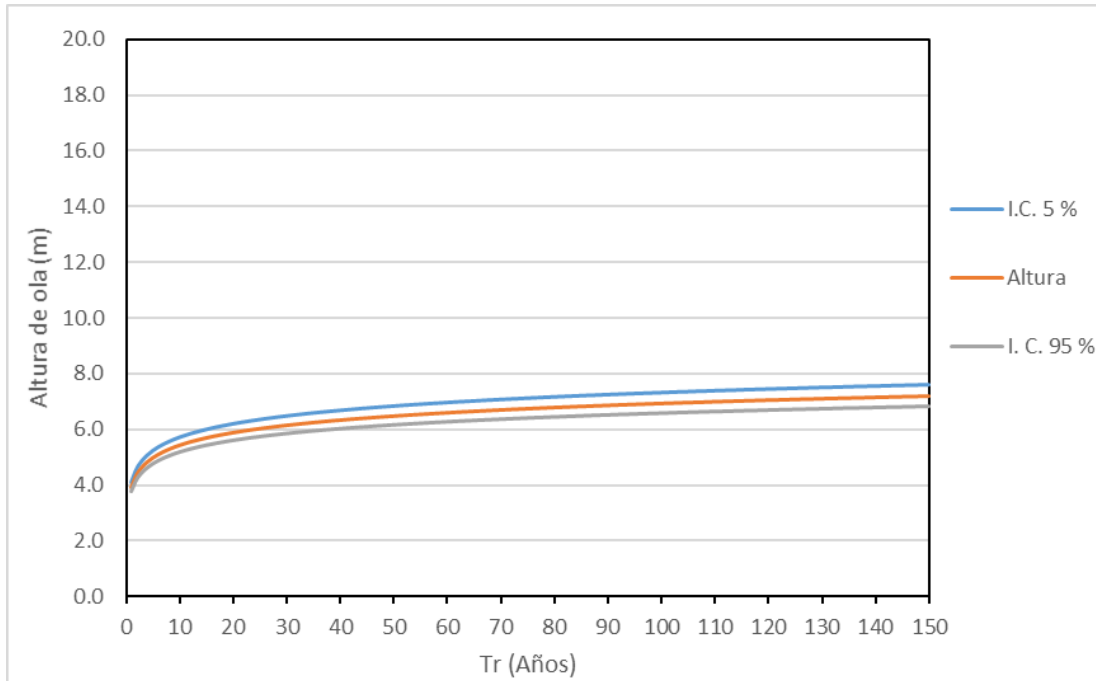


Figura A2.53 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 03

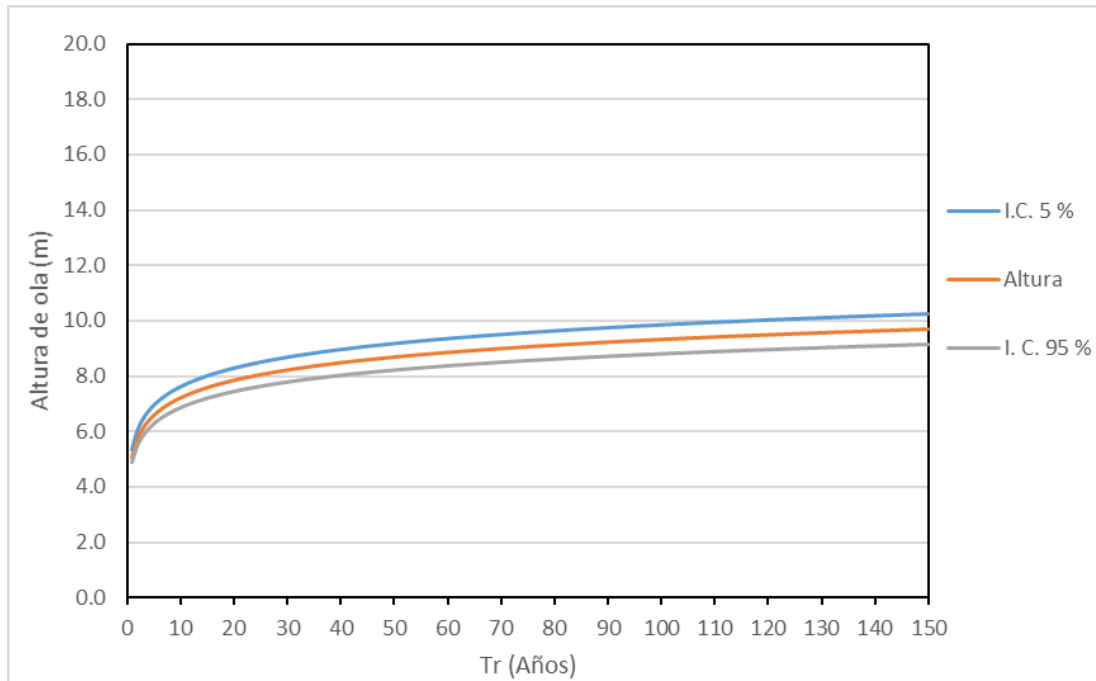


Figura A2.54 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 04

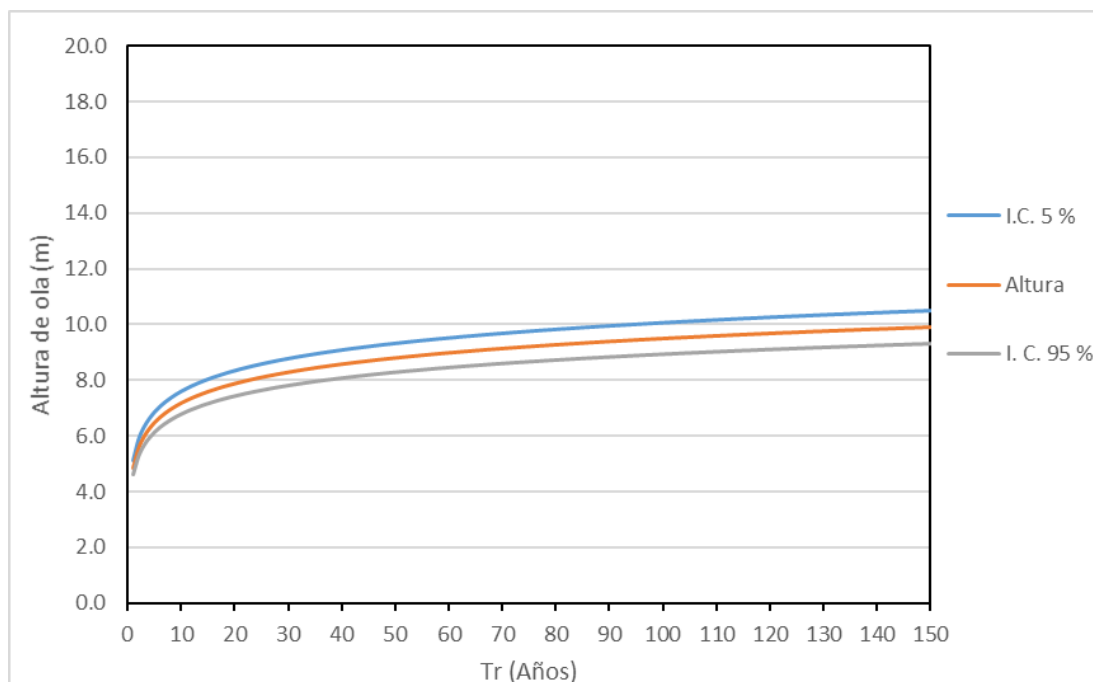


Figura A2.55 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 05

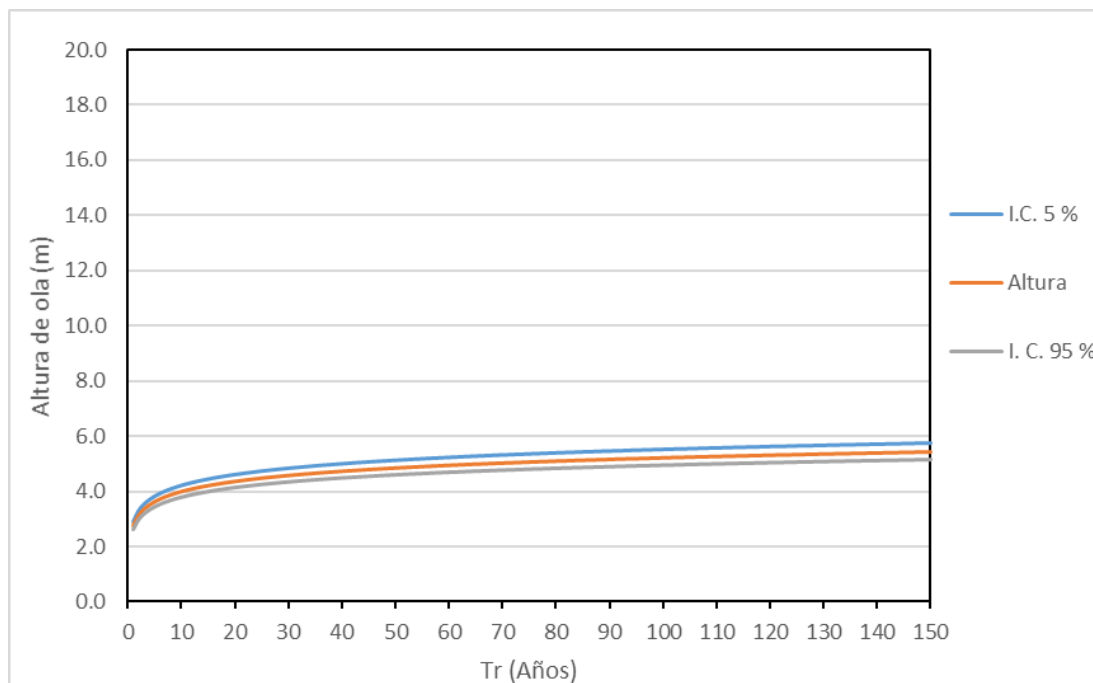


Figura A2.56 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 06

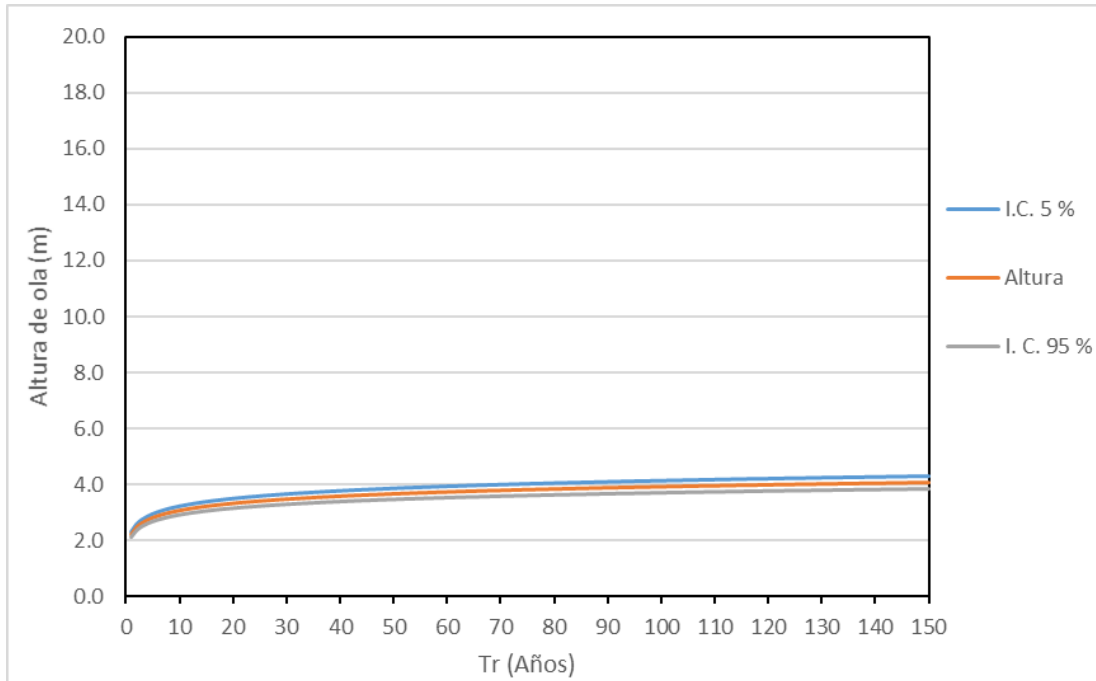


Figura A2.57 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 07

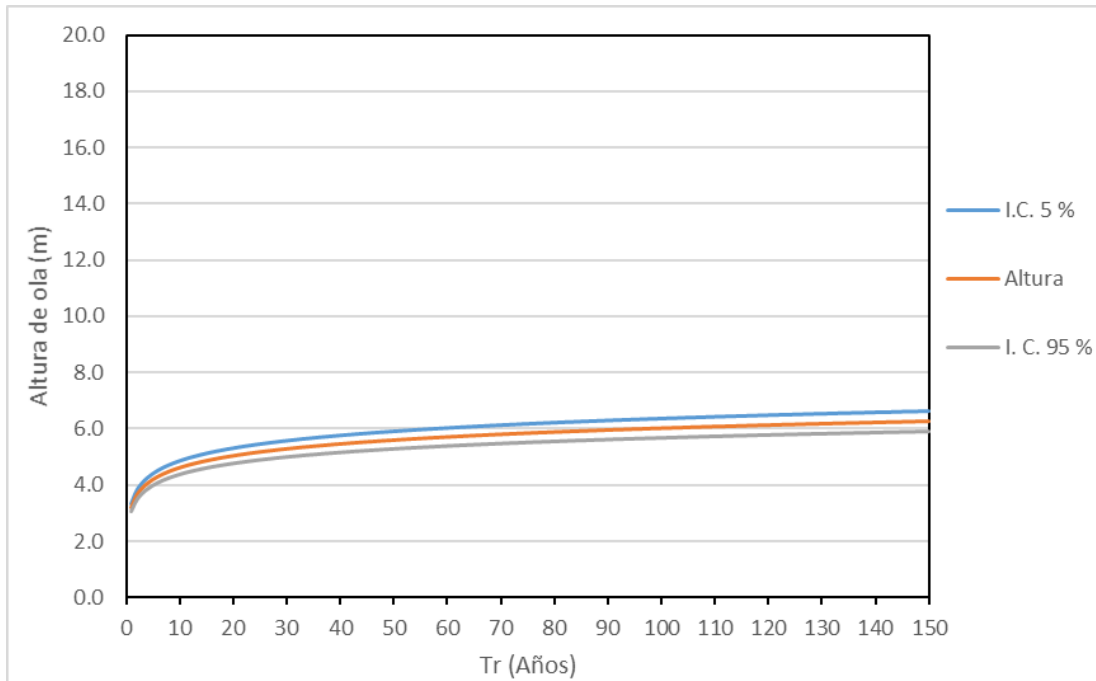


Figura A2.58 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 08

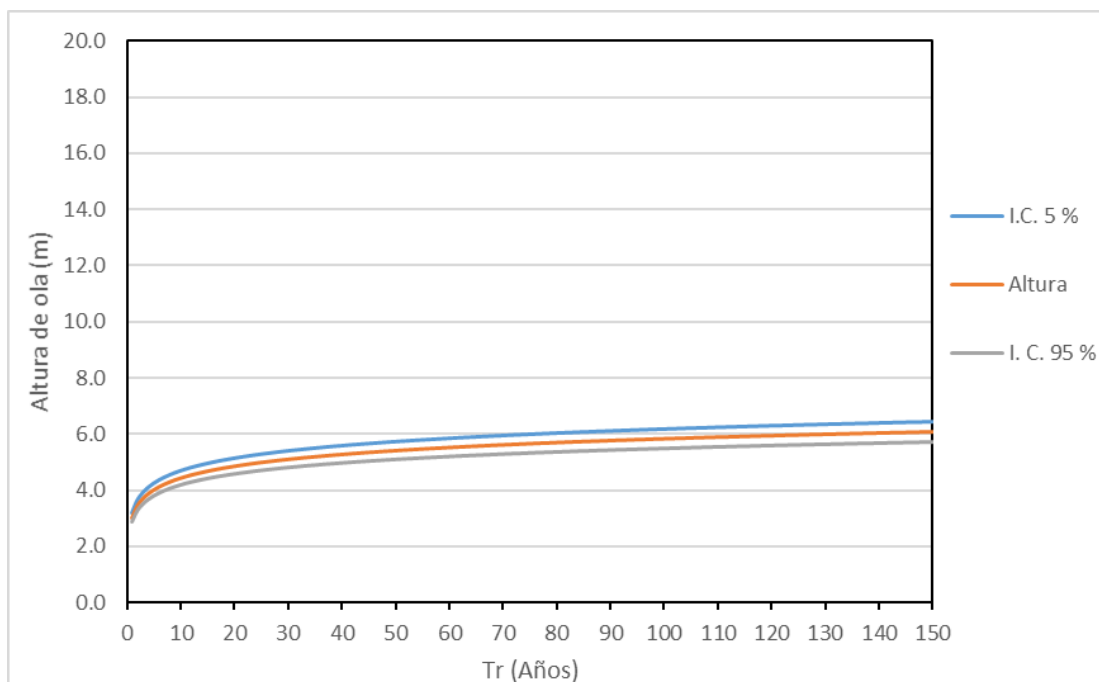


Figura A2.59 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 09

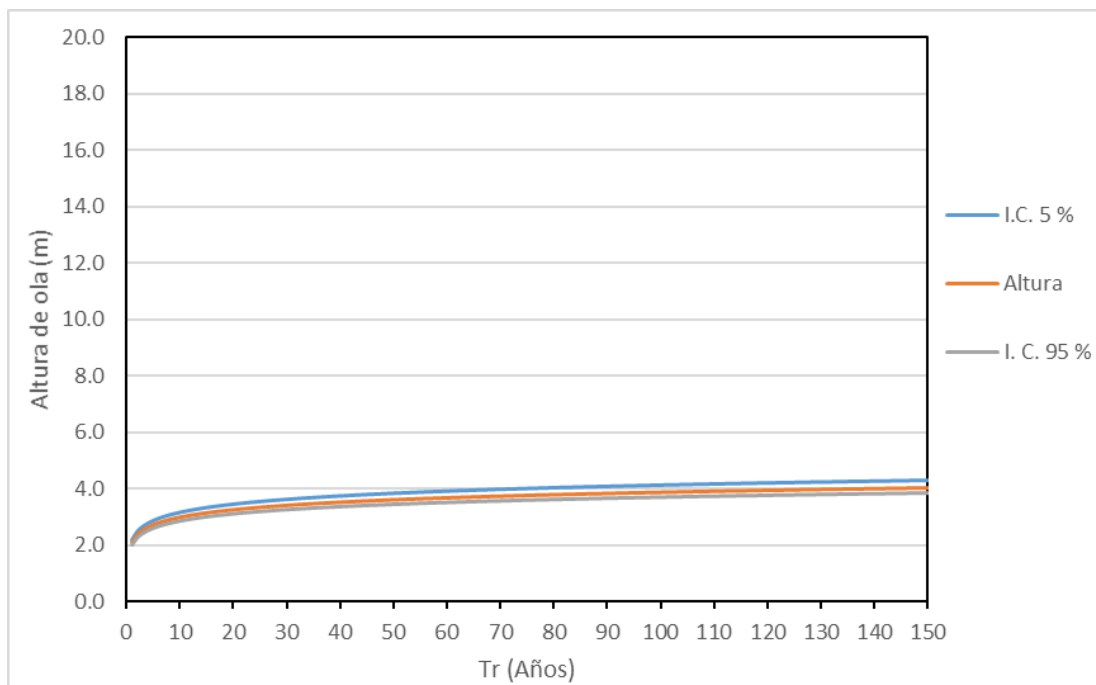


Figura A2.60 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Gumbel en el punto 10

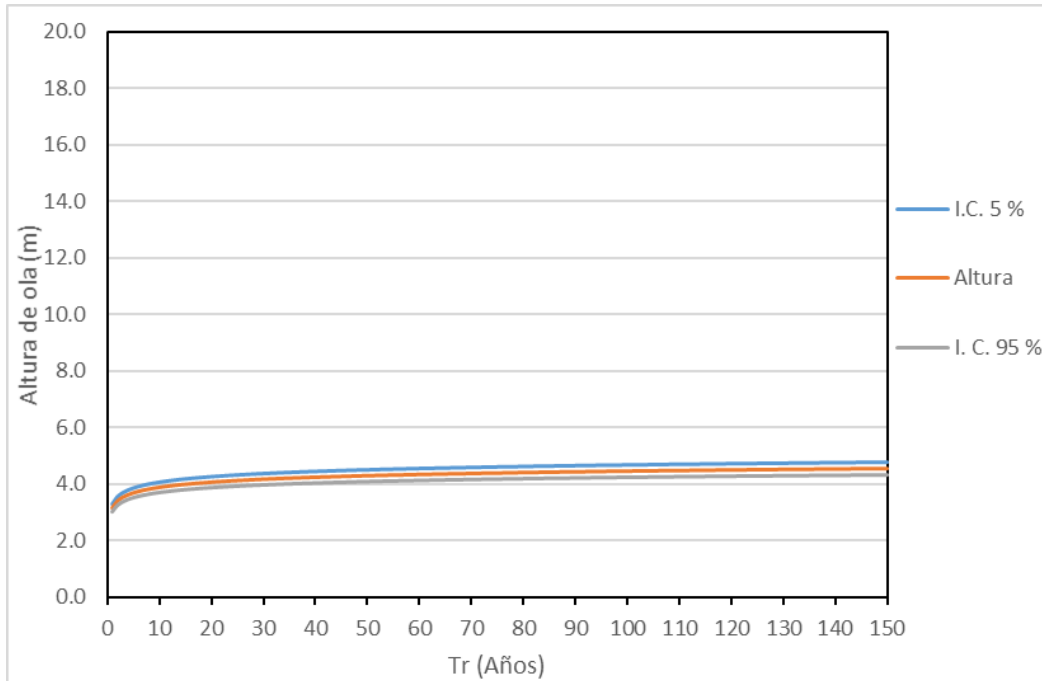


Figura A2.61 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 01

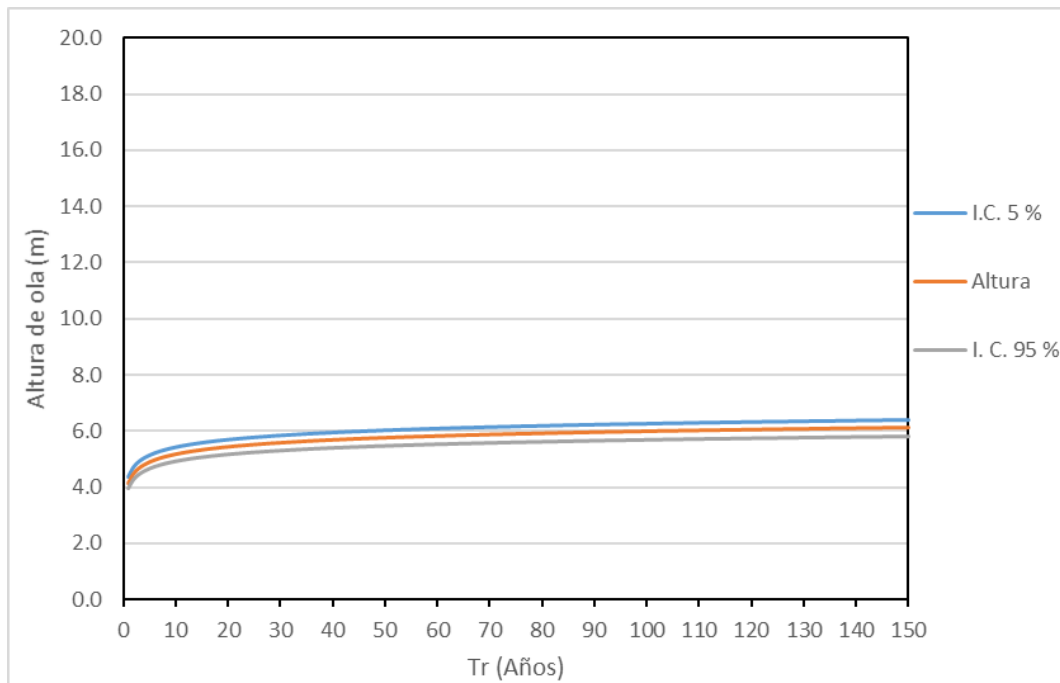


Figura A2.62 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 02

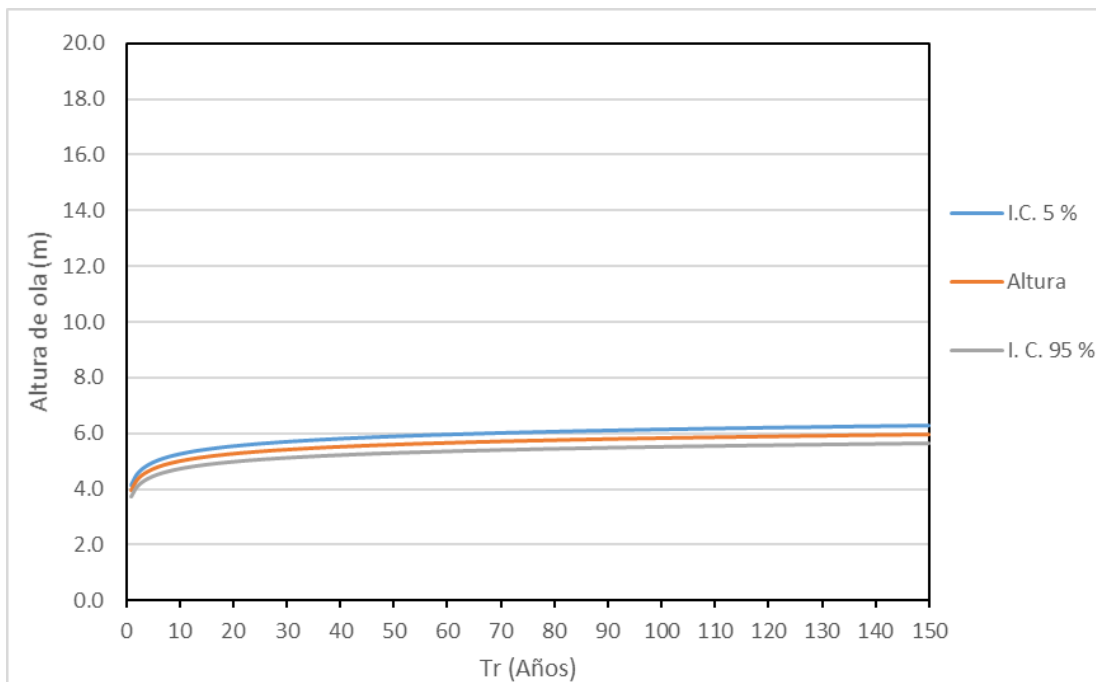


Figura A2.63 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 03

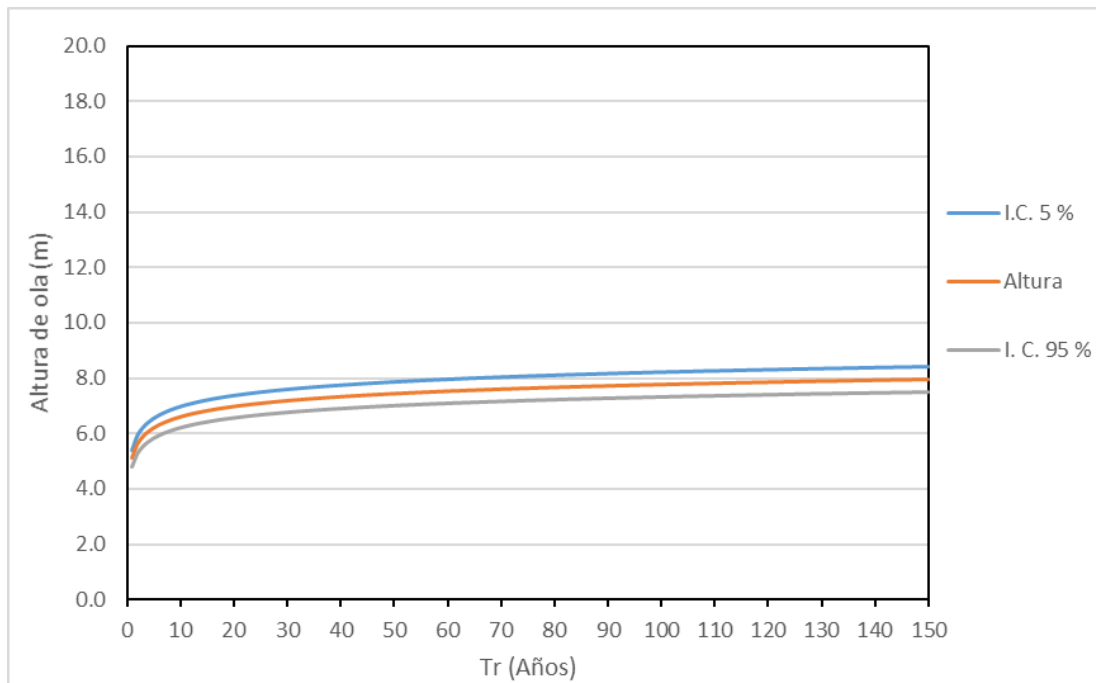


Figura A2.64 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 04

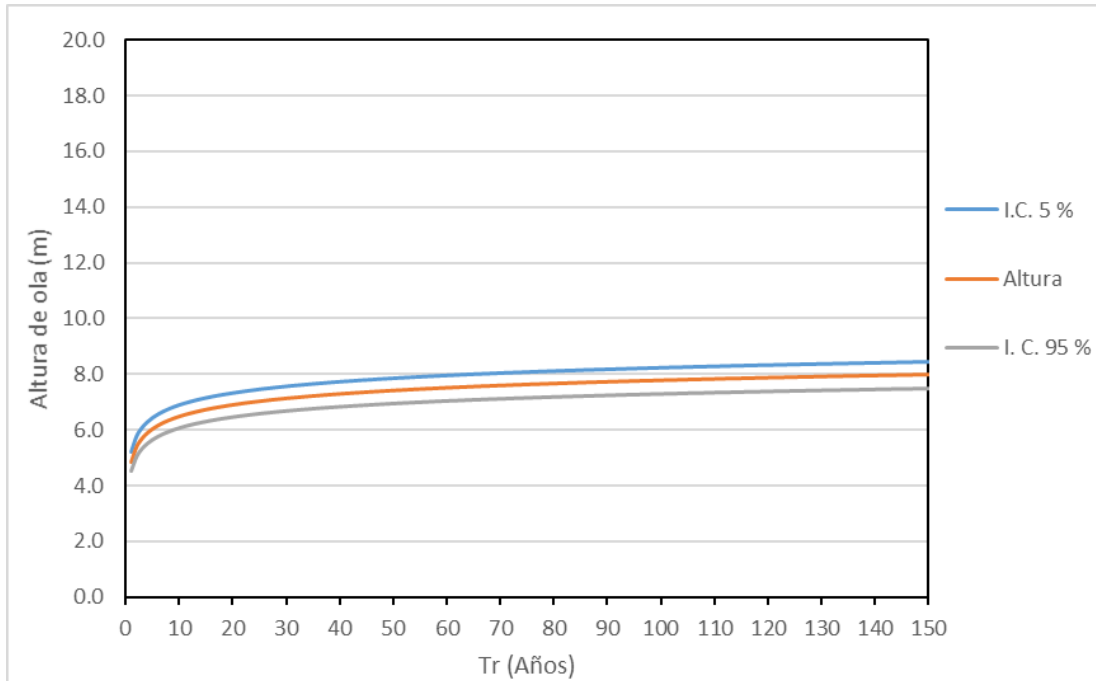


Figura A2.65 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 05

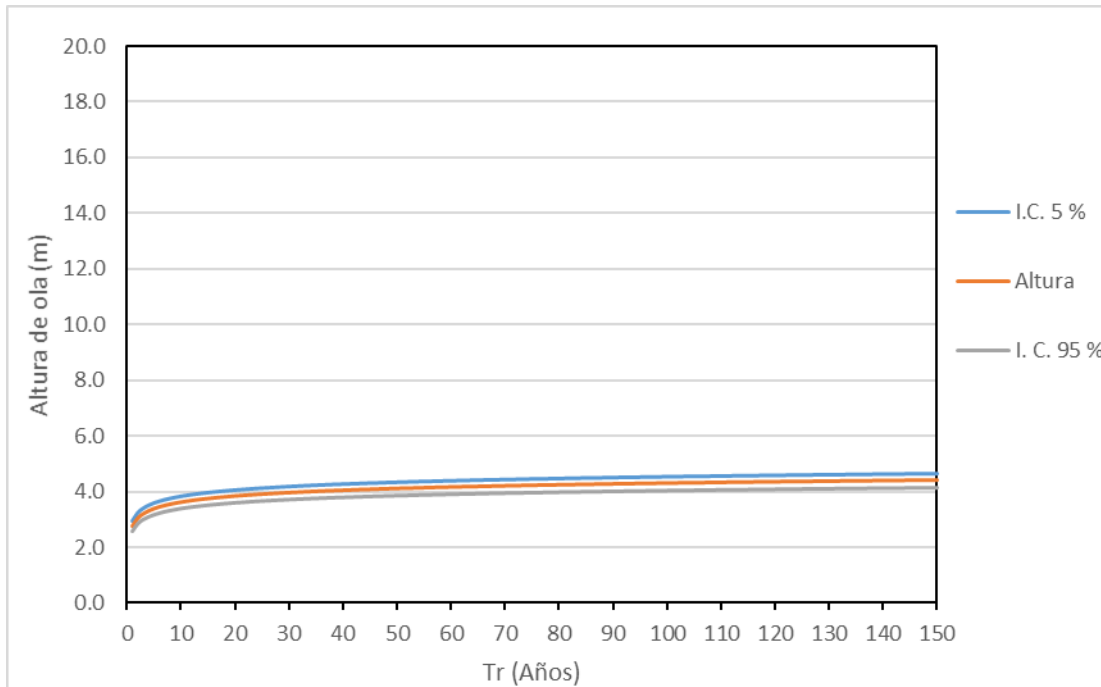


Figura A2.66 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 06

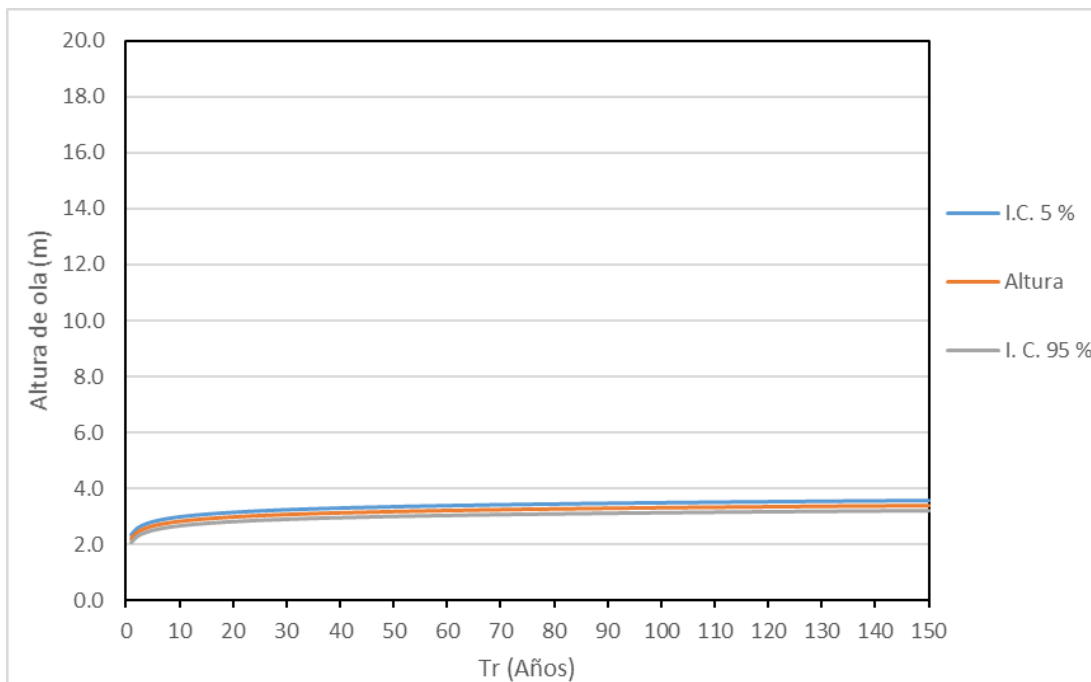


Figura A2.67 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 07

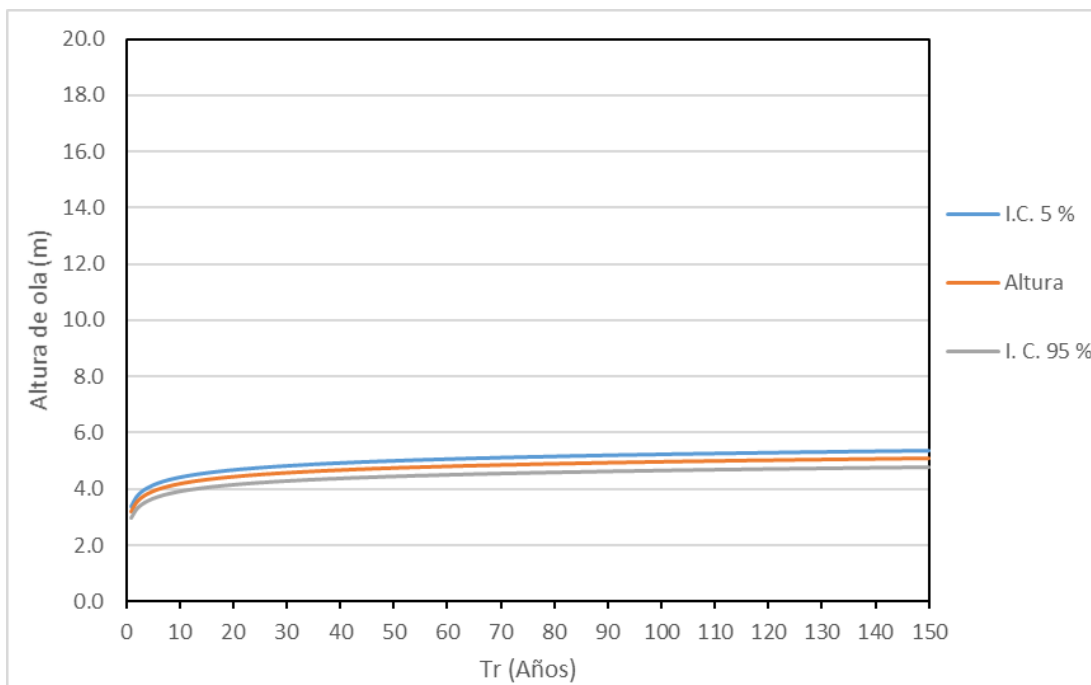


Figura A2.68 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 08

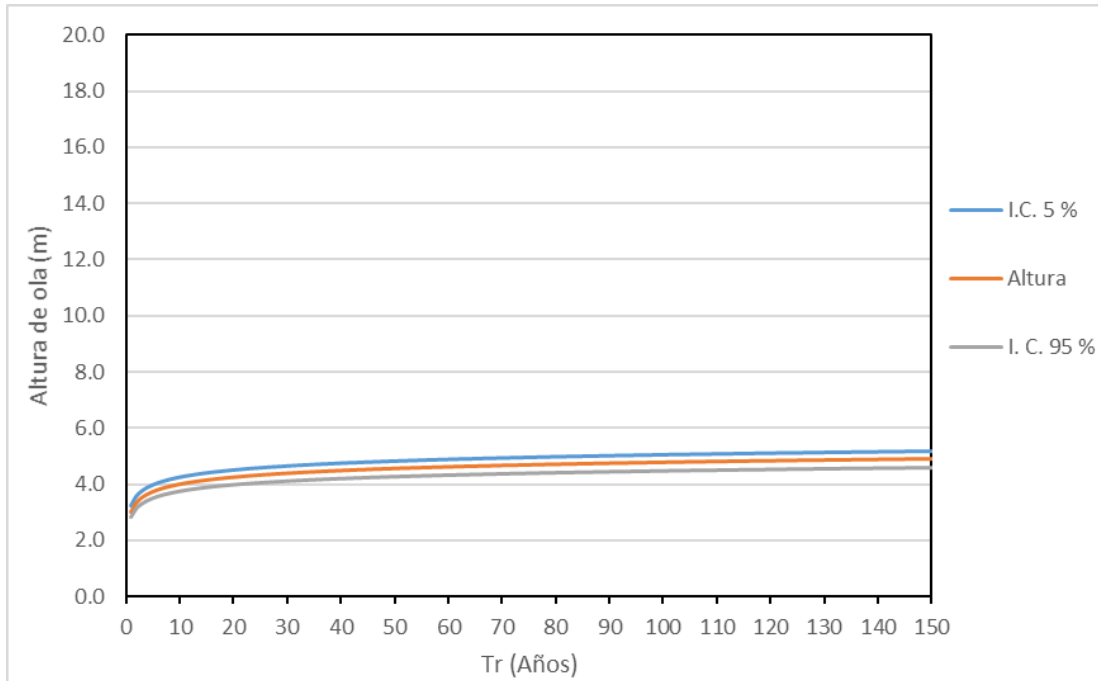


Figura A2.69 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 09

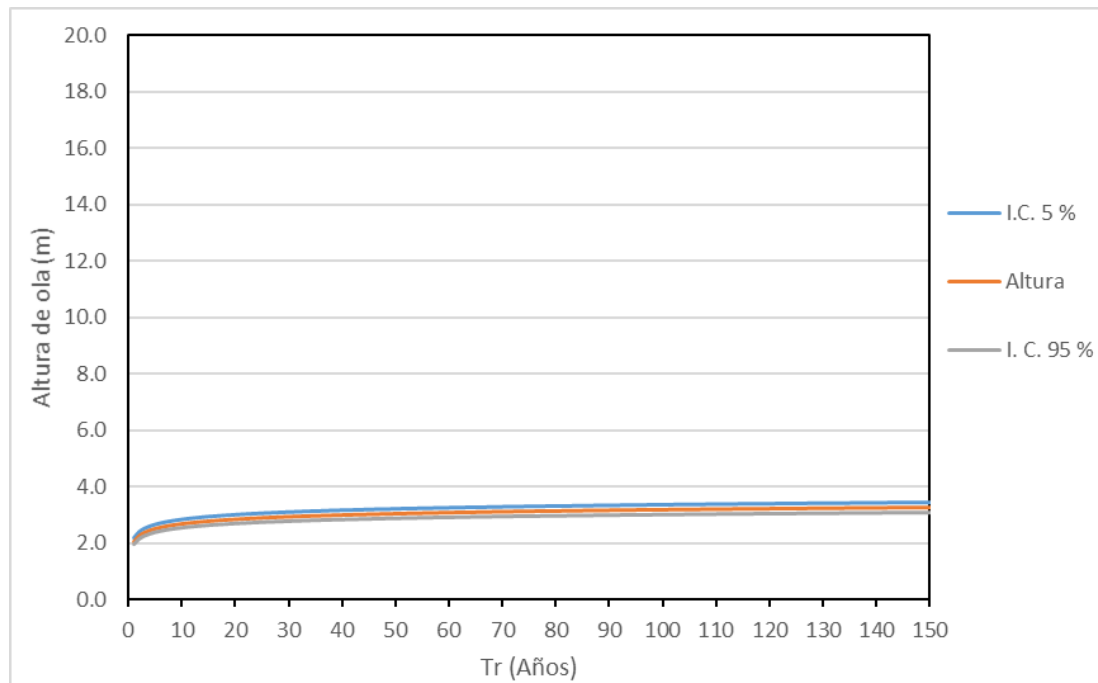


Figura A2.70 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Rayleigh en el punto 10

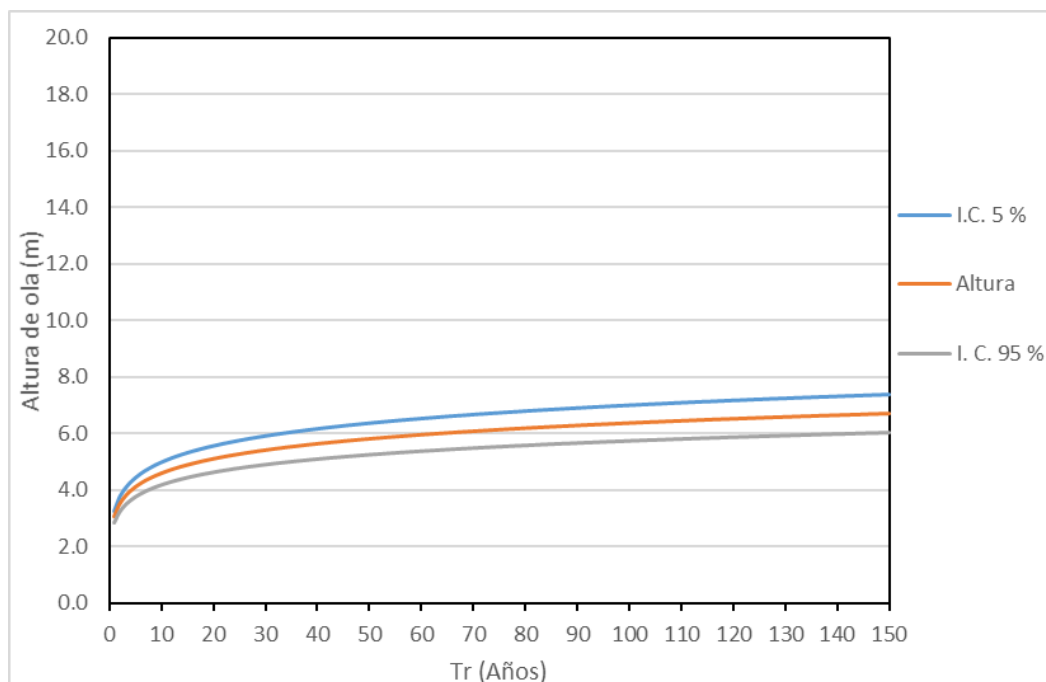


Figura A2.71 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $K = 0.75$ en el punto 01

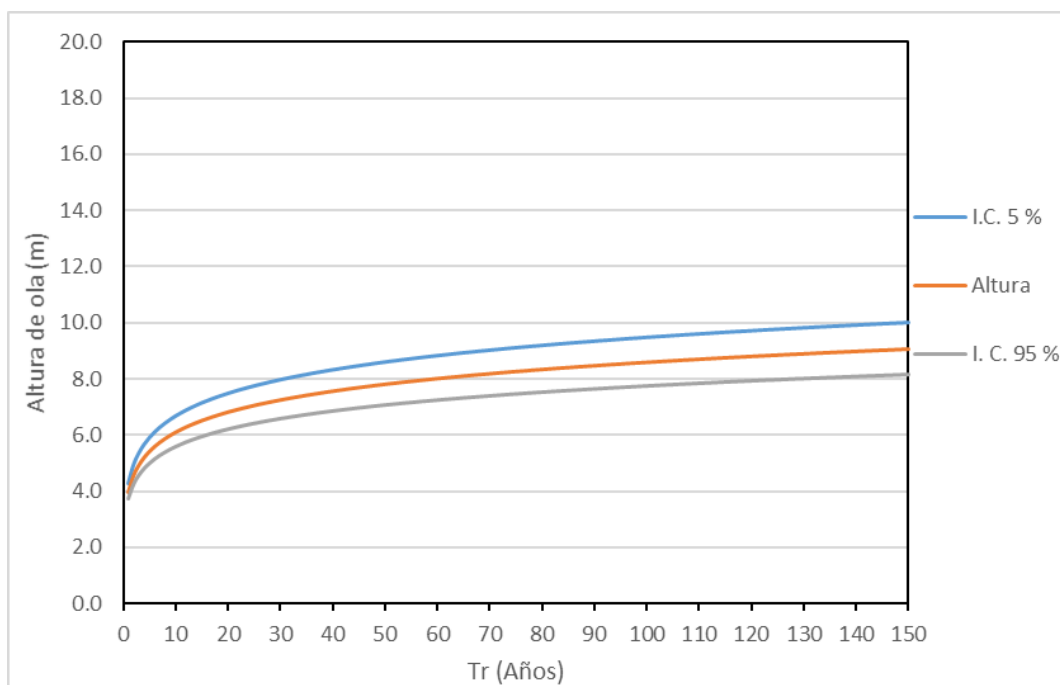


Figura A2.72 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k = 0.75$ en el punto 02

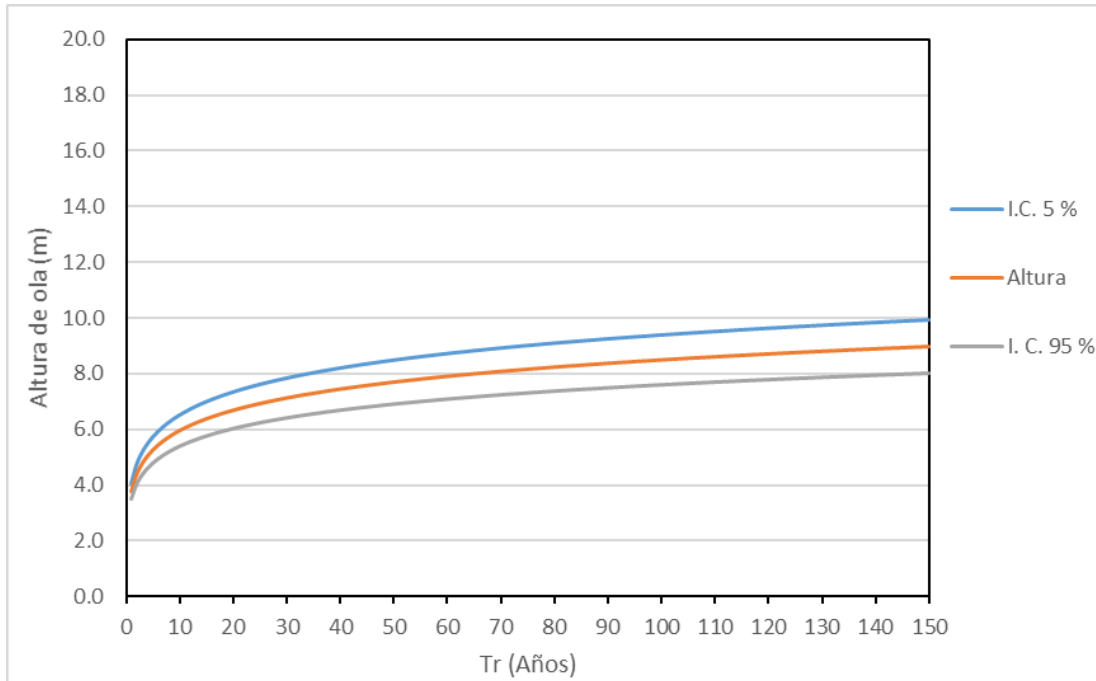


Figura A2.73 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 0.75$ en el punto 03

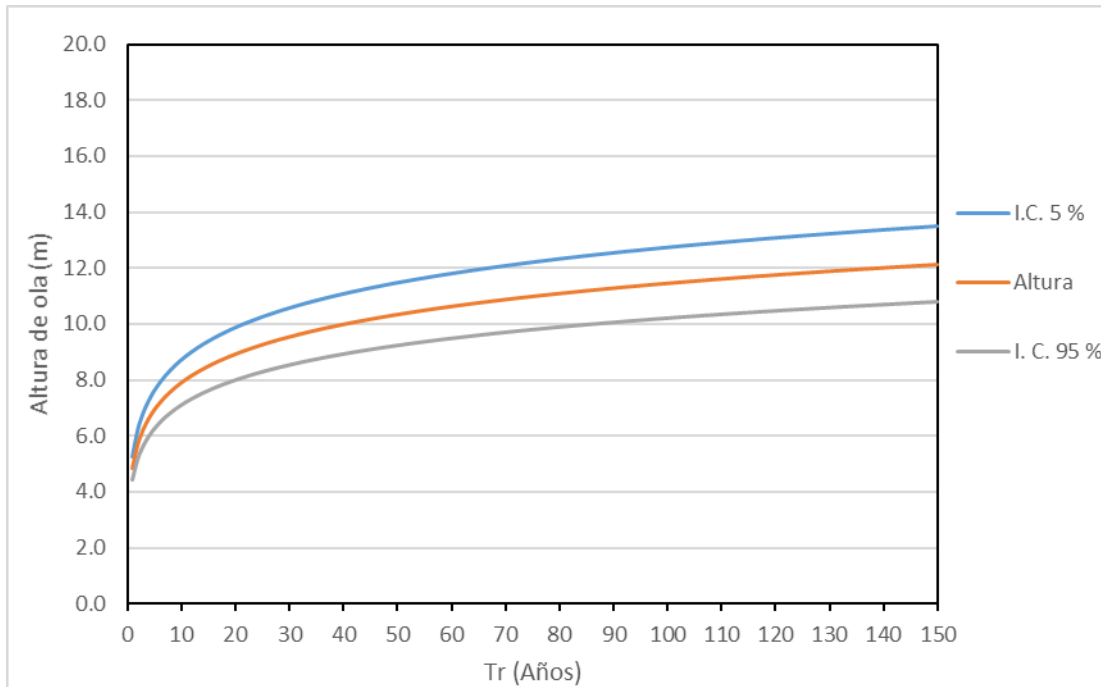


Figura A2.74 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 0.75$ en el punto 04

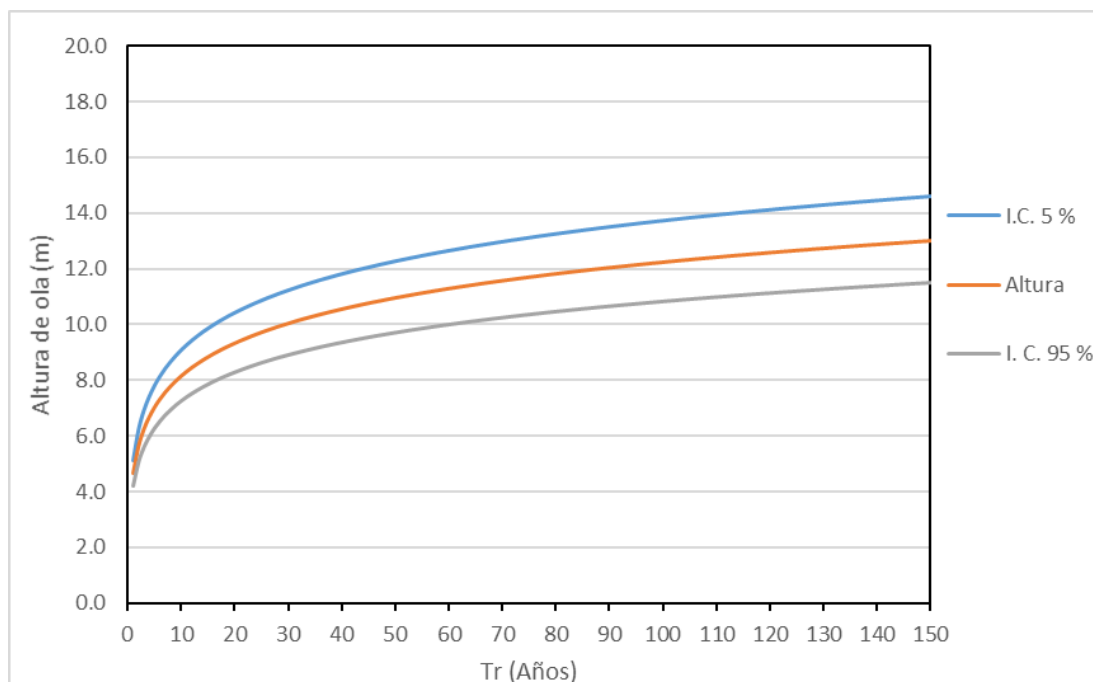


Figura A2.75 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 0.75$ en el punto 05

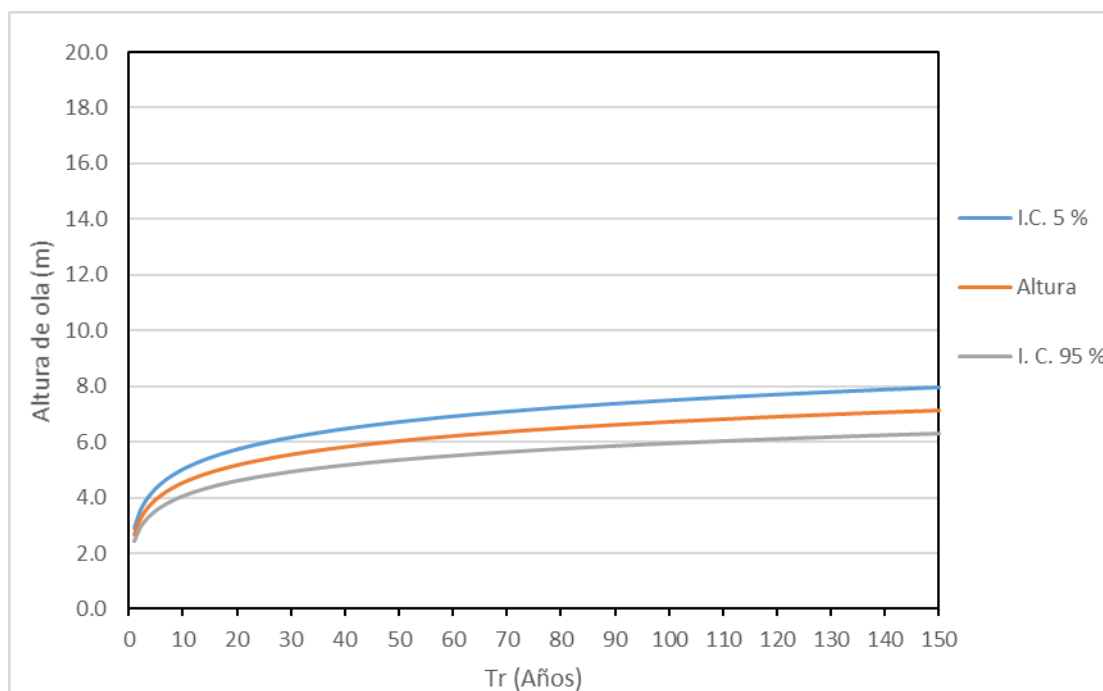


Figura A2.76 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 0.75$ en el punto 06

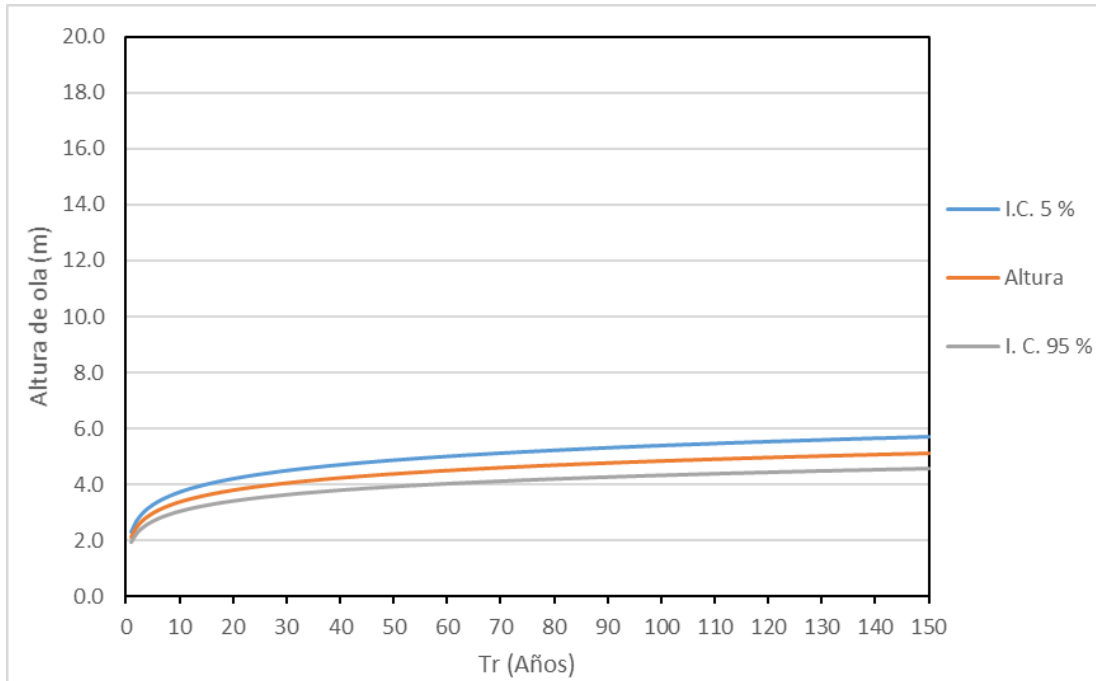


Figura A2.77 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 0.75$ en el punto 07

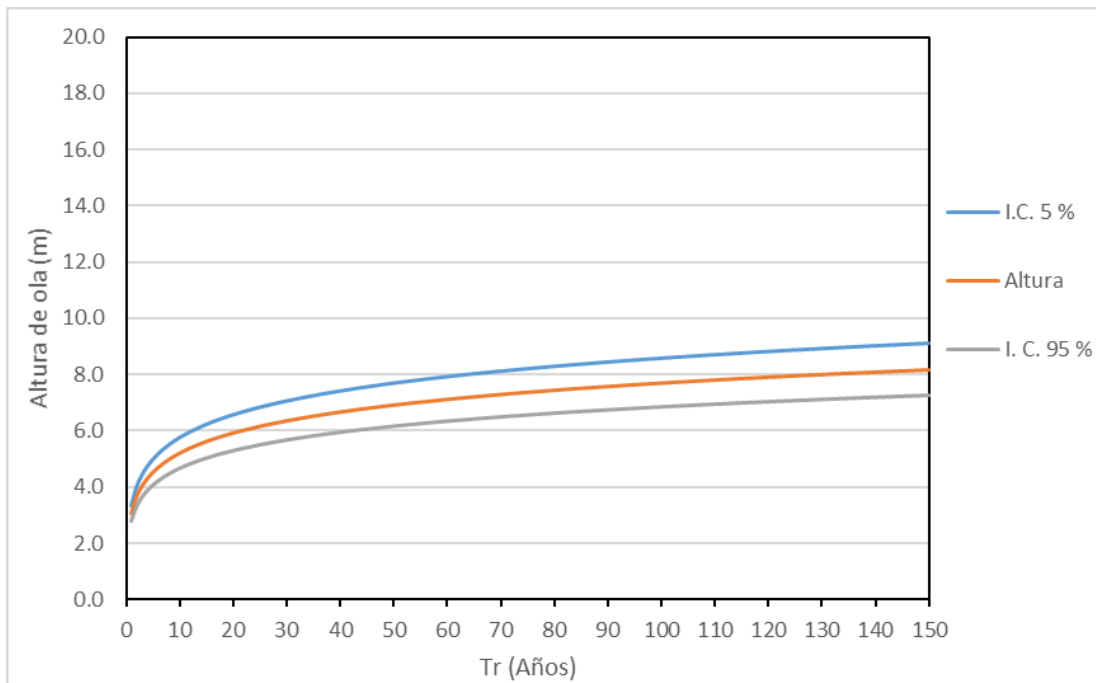


Figura A2.78 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 0.75$ en el punto 08

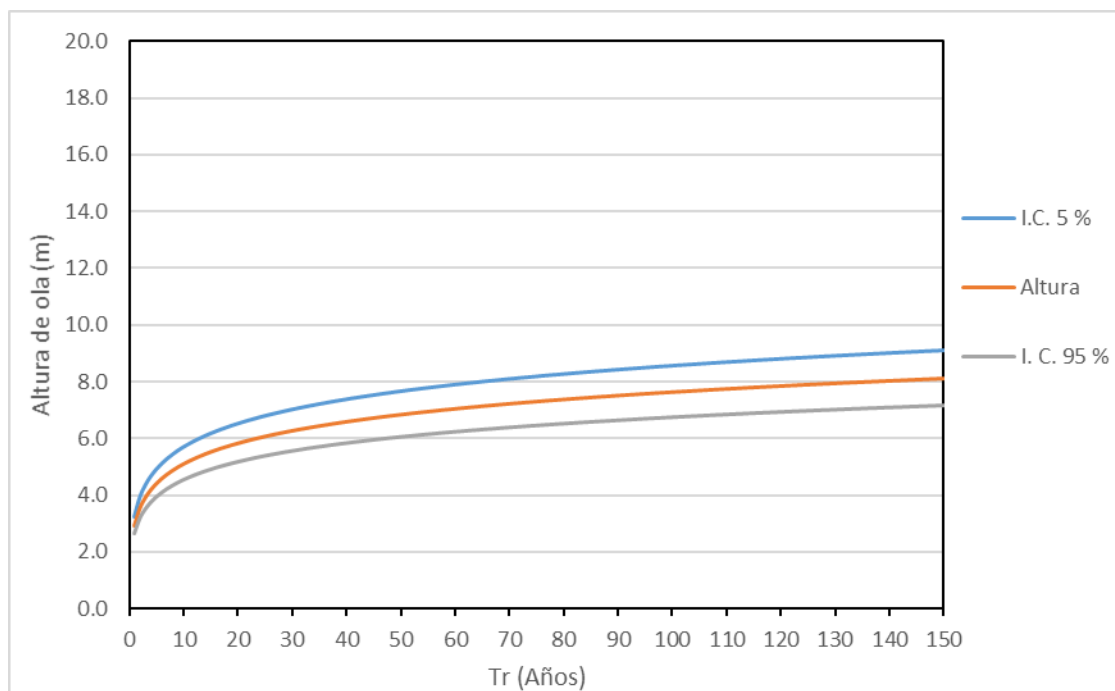


Figura A2.79 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 0.75$ en el punto 09

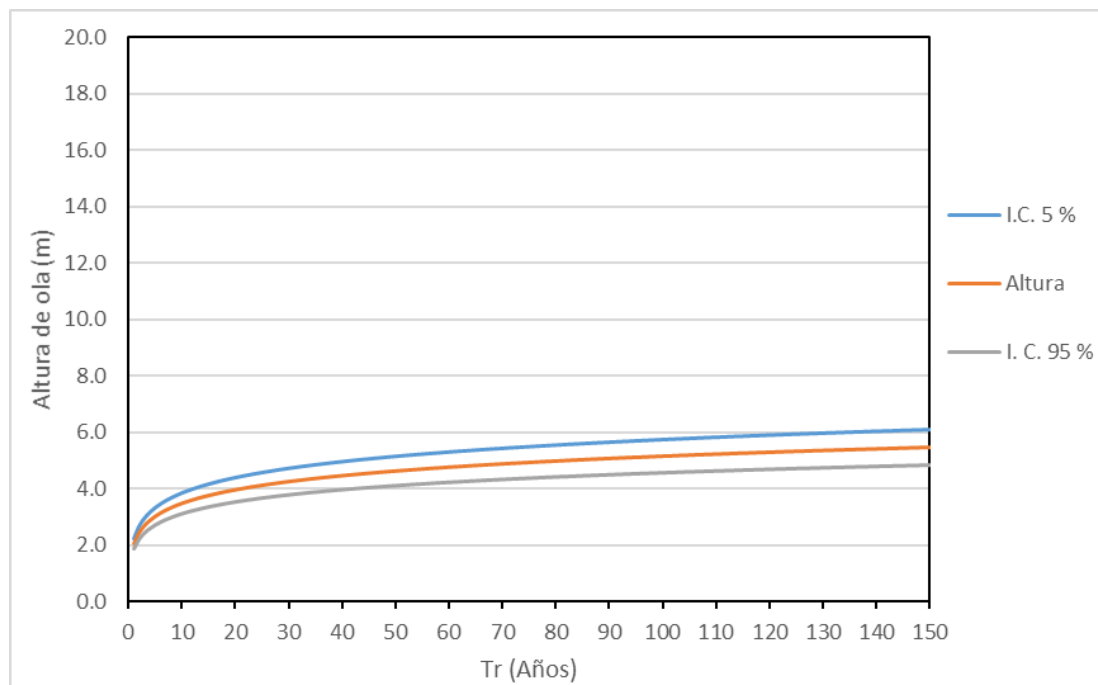


Figura A2.80 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 0.75$ en el punto 10

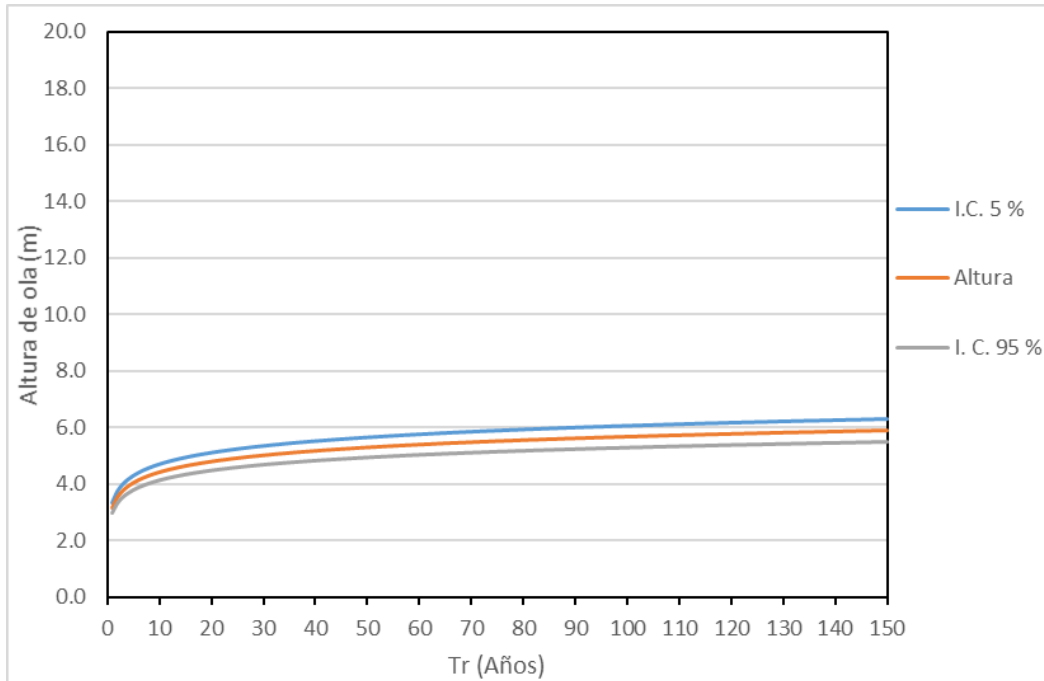


Figura A2.81 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 01

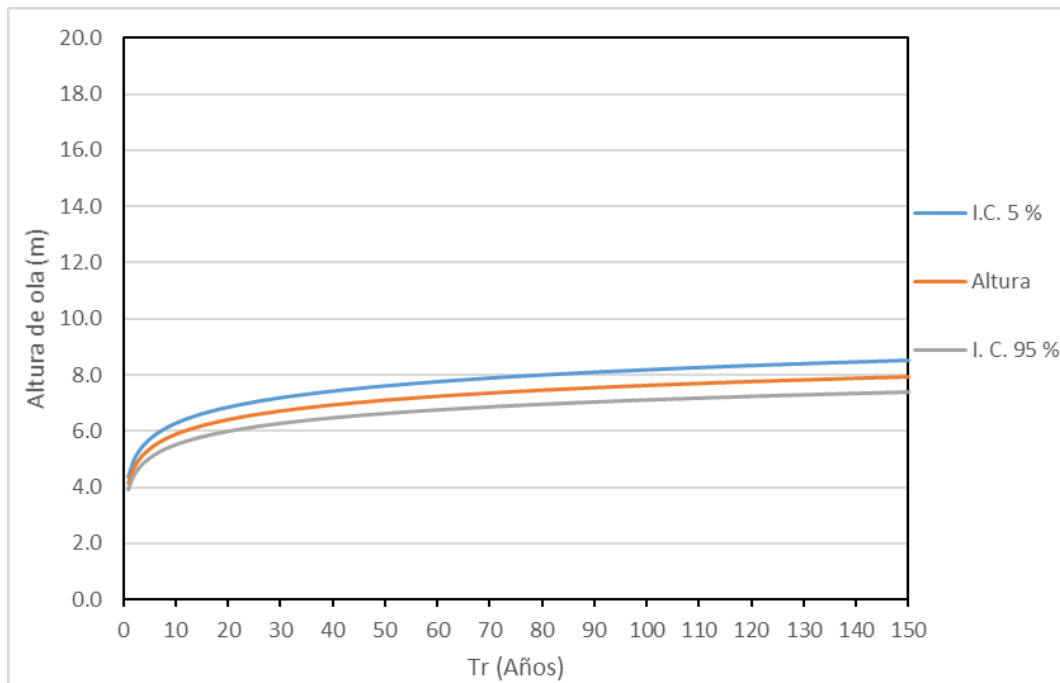


Figura A2.82 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 02

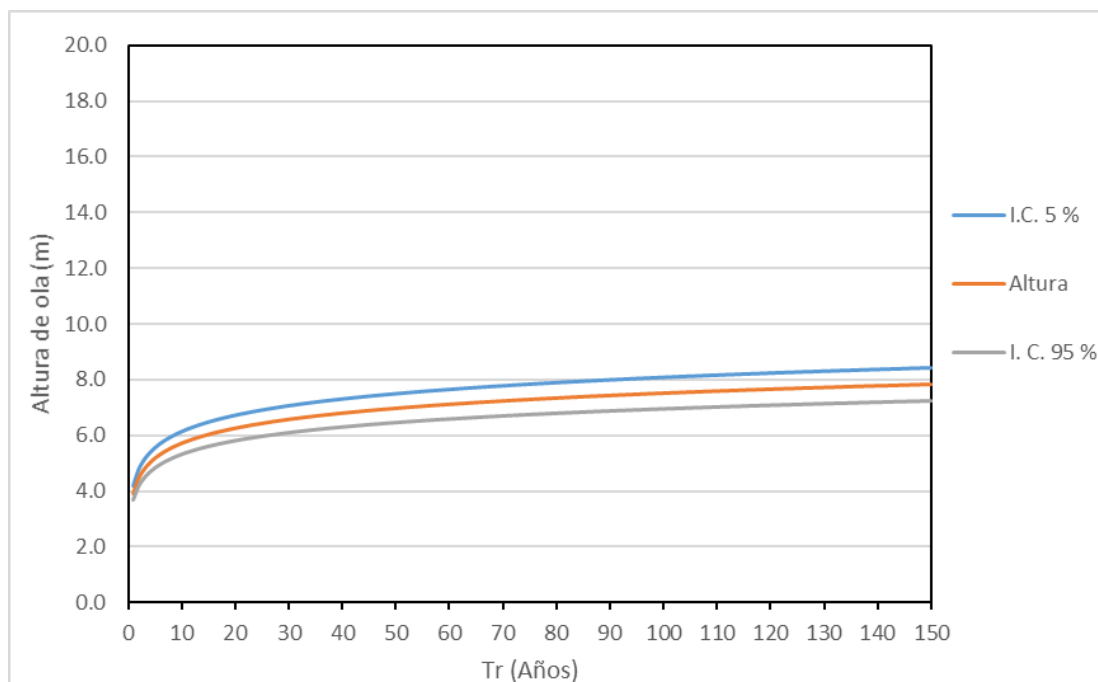


Figura A2.83 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 03

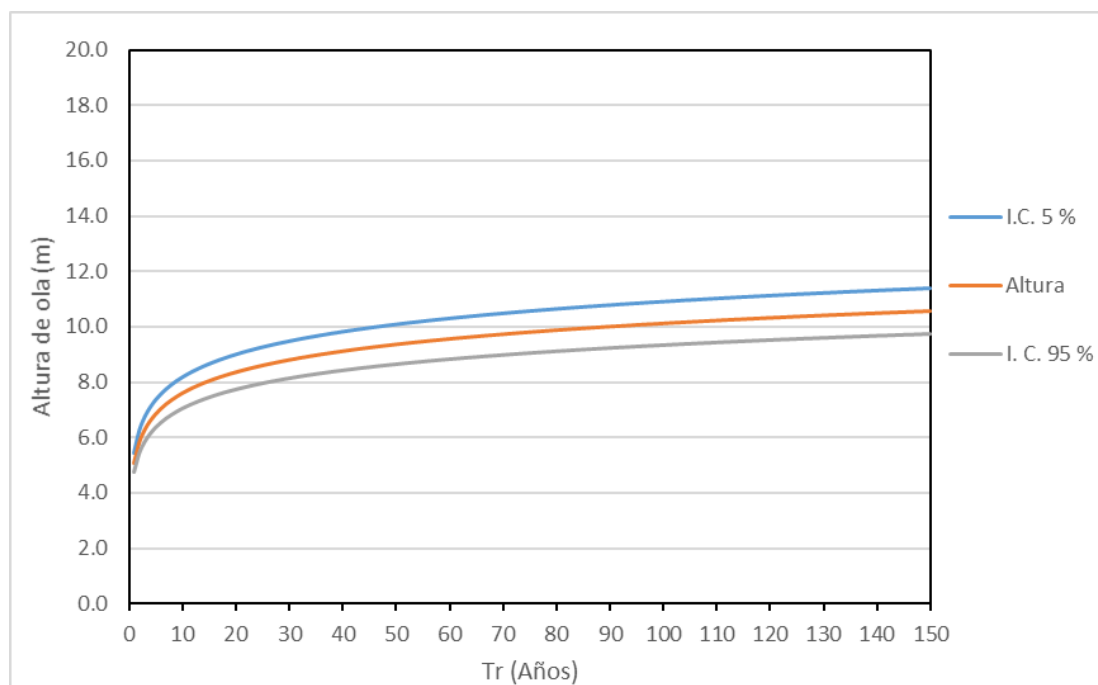


Figura A2.84 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 04

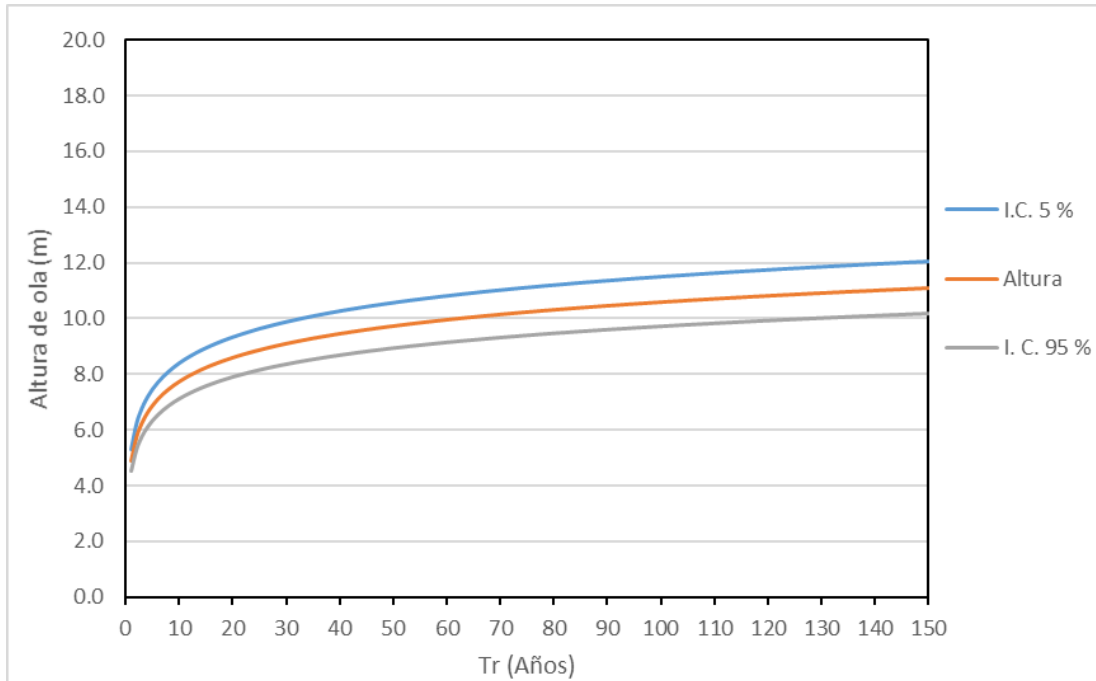


Figura A2.85 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 05

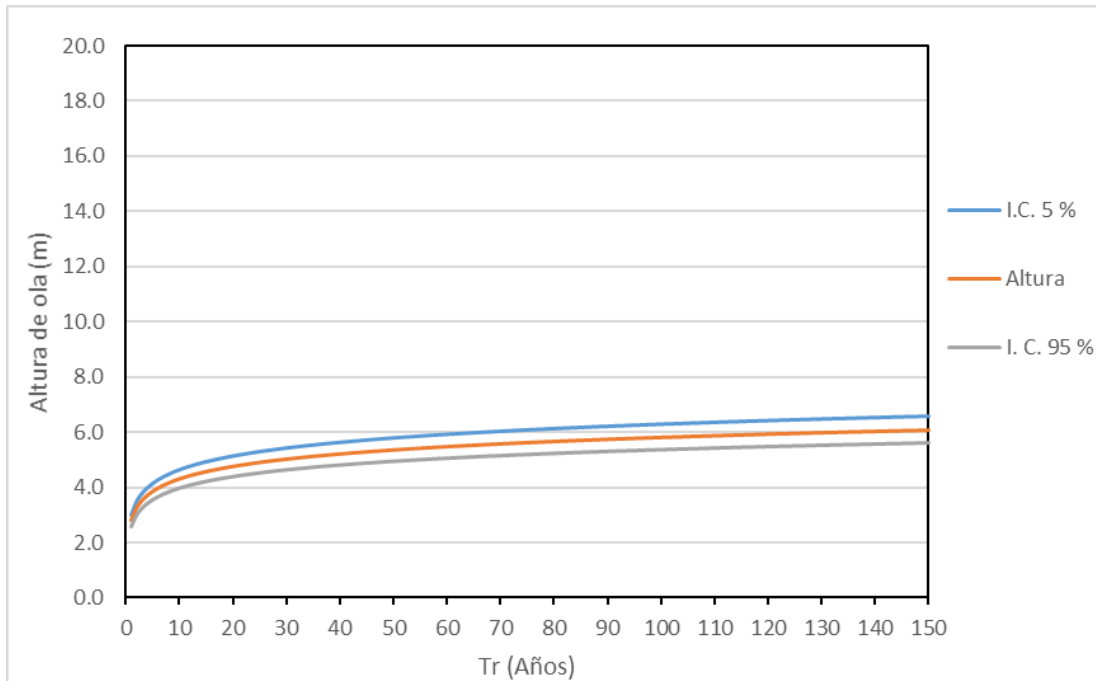


Figura A2.86 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 06

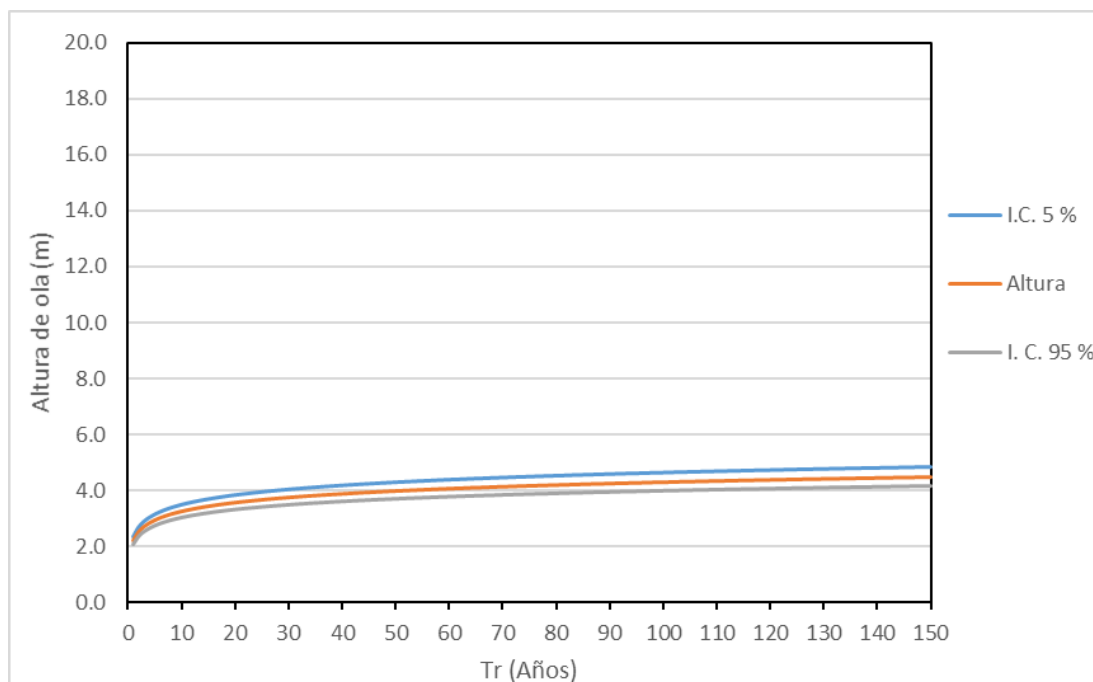


Figura A2.87 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 07

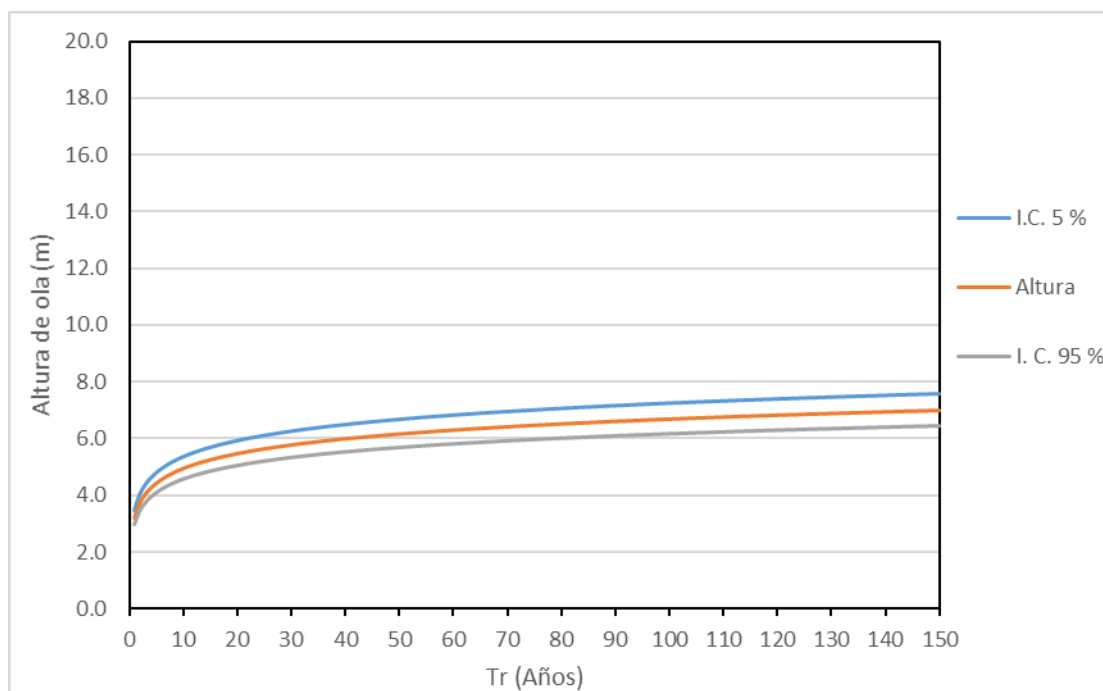


Figura A2.88 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 08

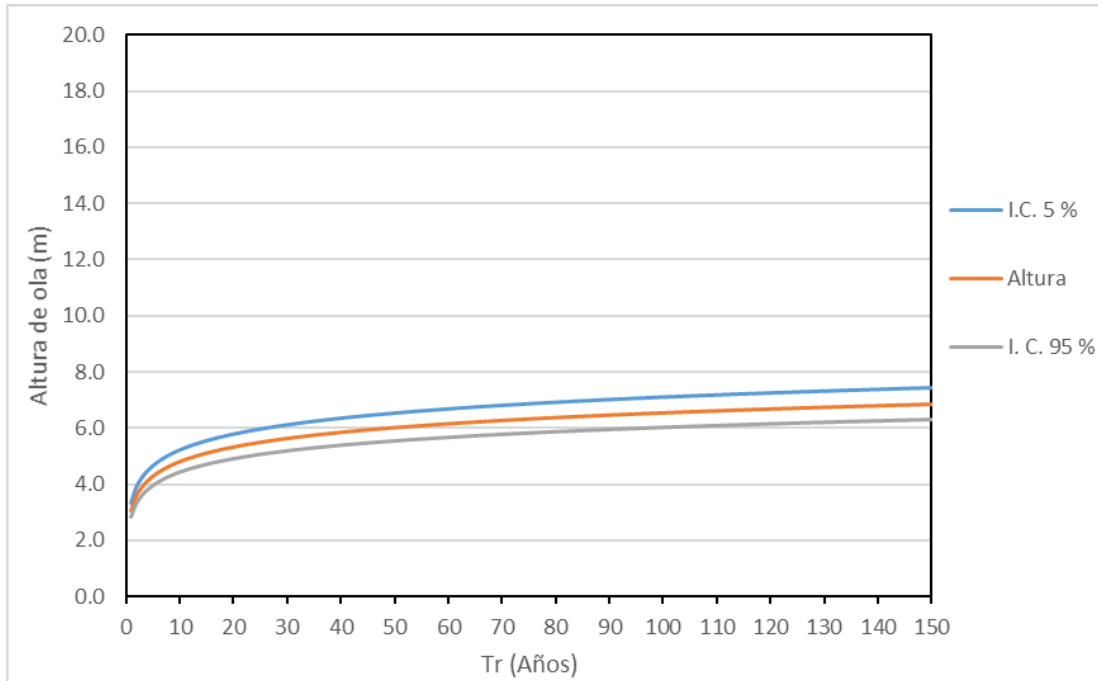


Figura A2.89 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 09

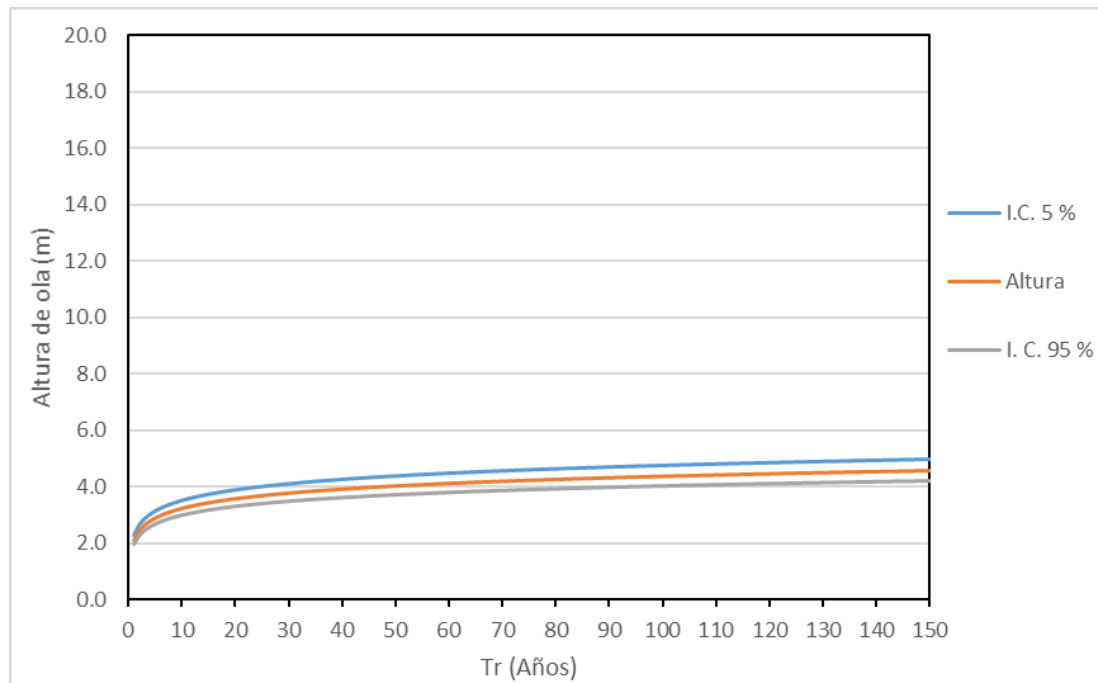


Figura A2.90 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.0$ en el punto 10

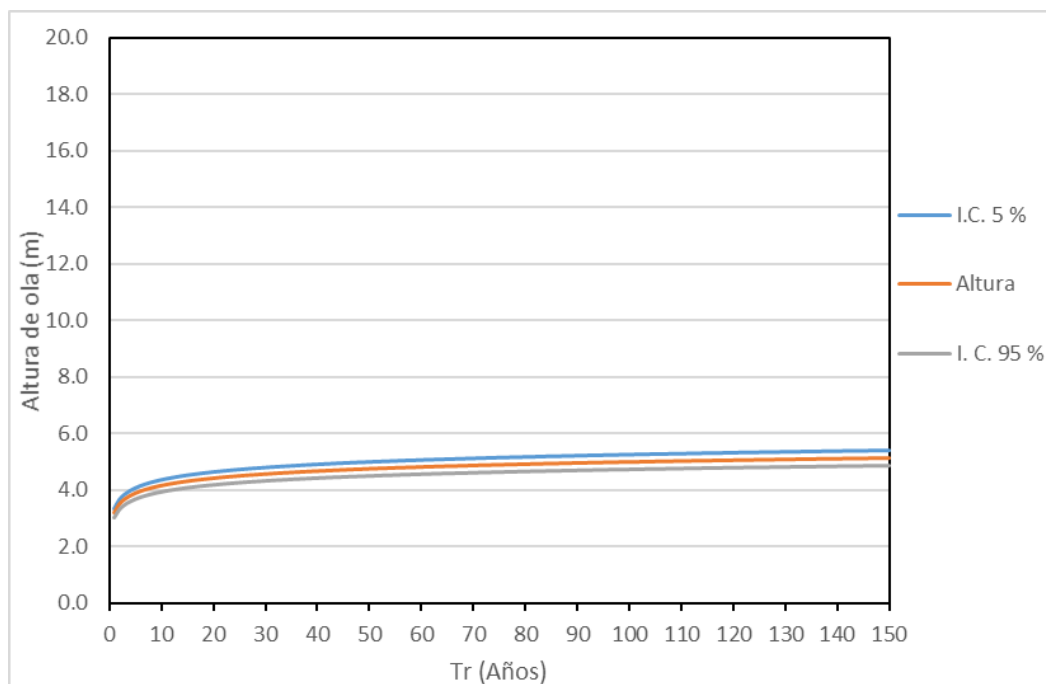


Figura A2.91 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 01

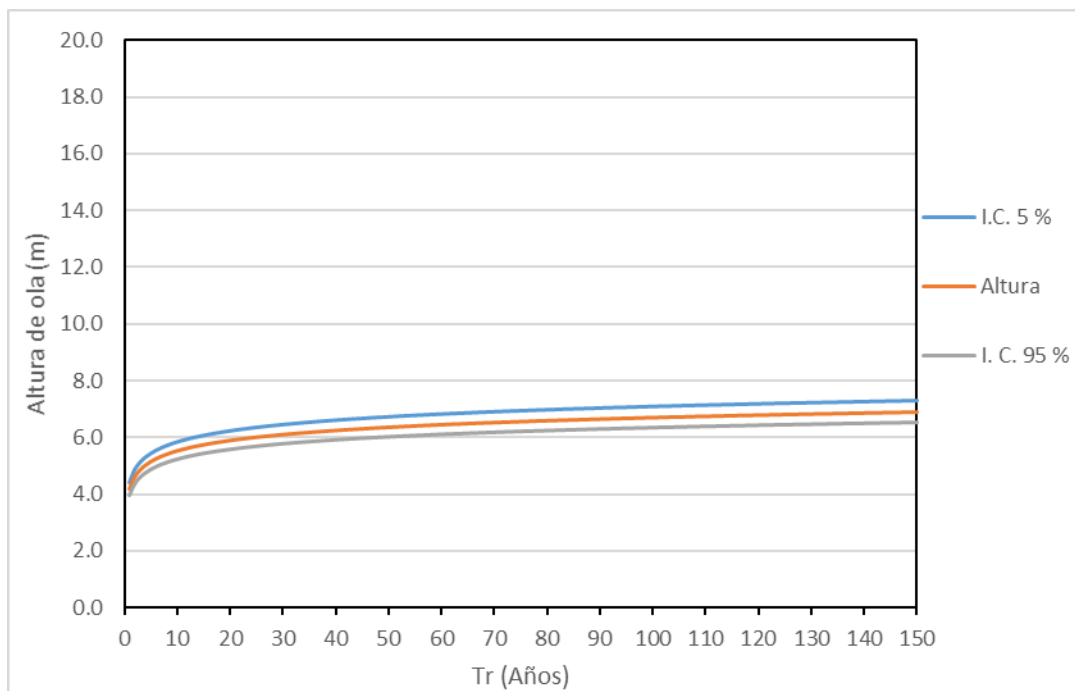


Figura A2.92 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 02

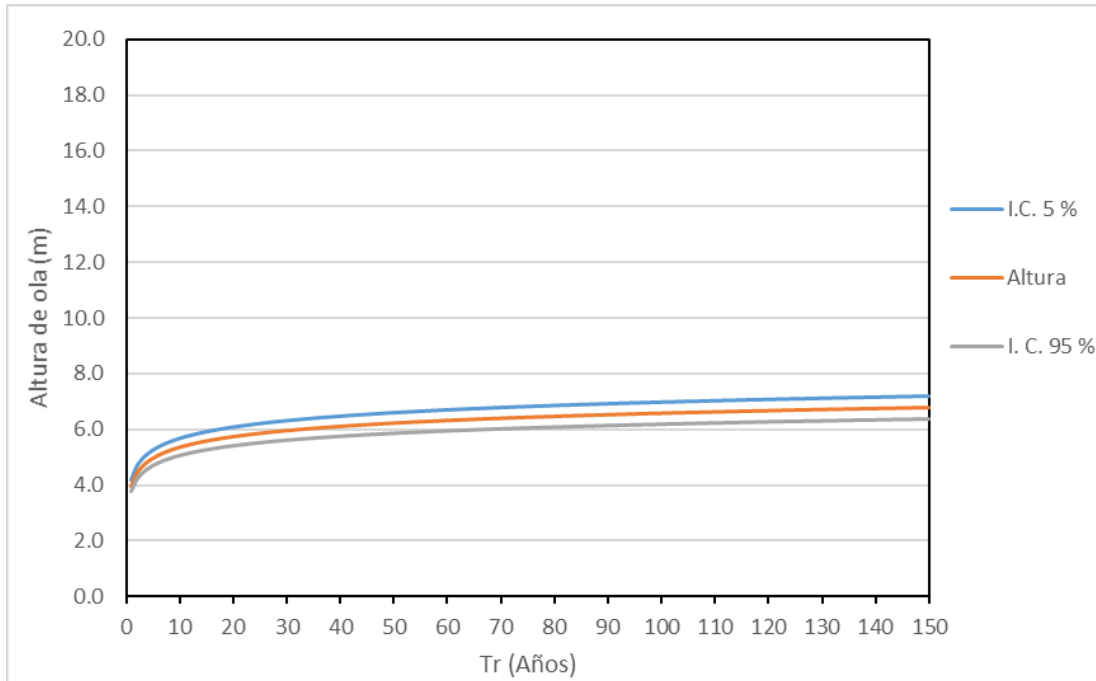


Figura A2.93 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 03

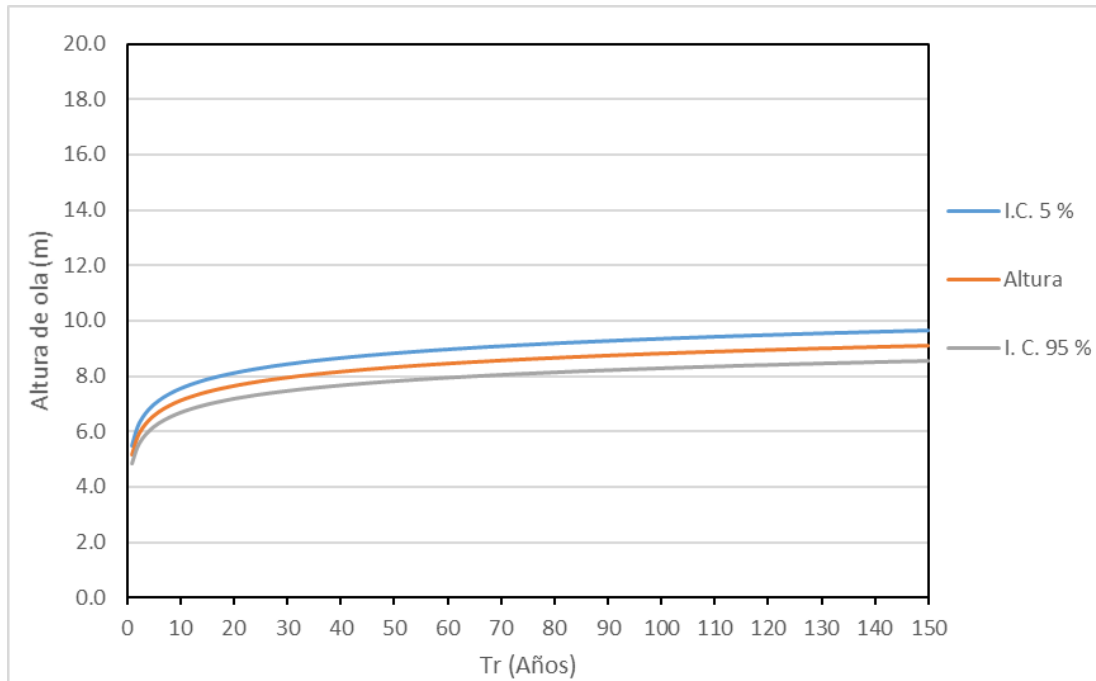


Figura A2.94 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 04

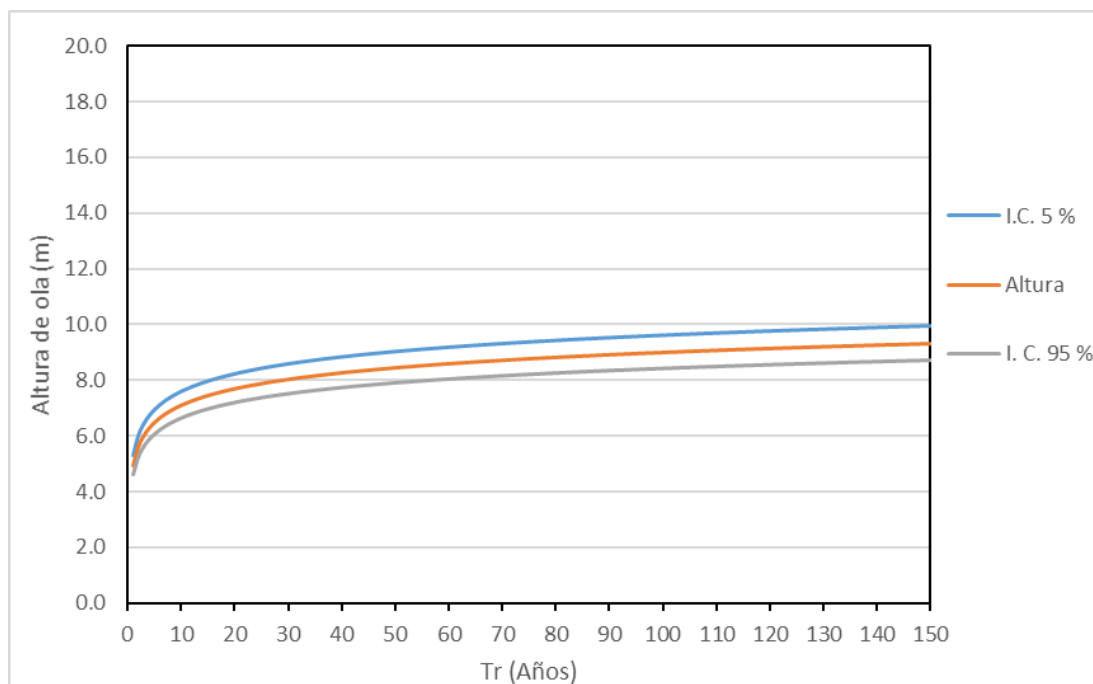


Figura A2.95 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 05

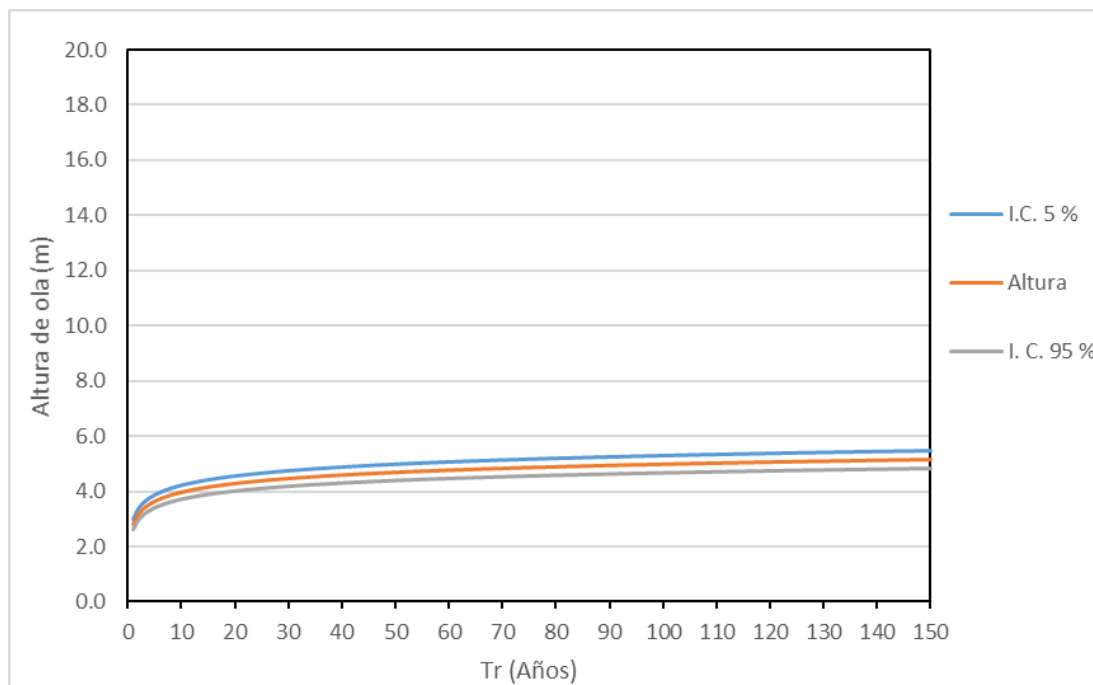


Figura A2.96 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 06

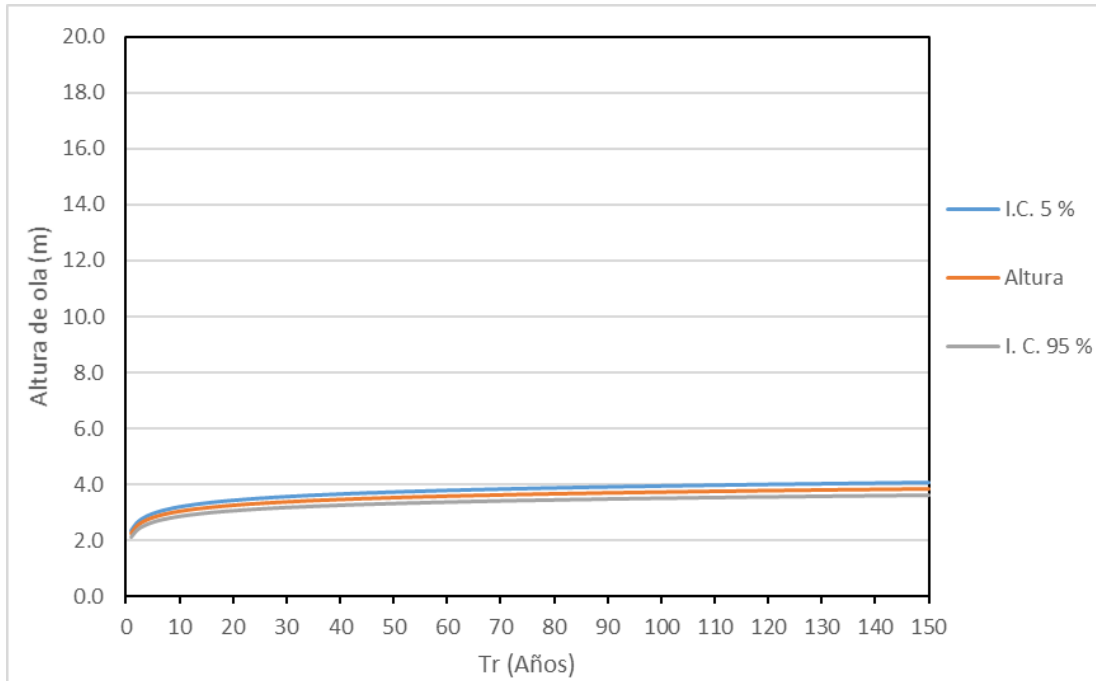


Figura A2.97 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 07

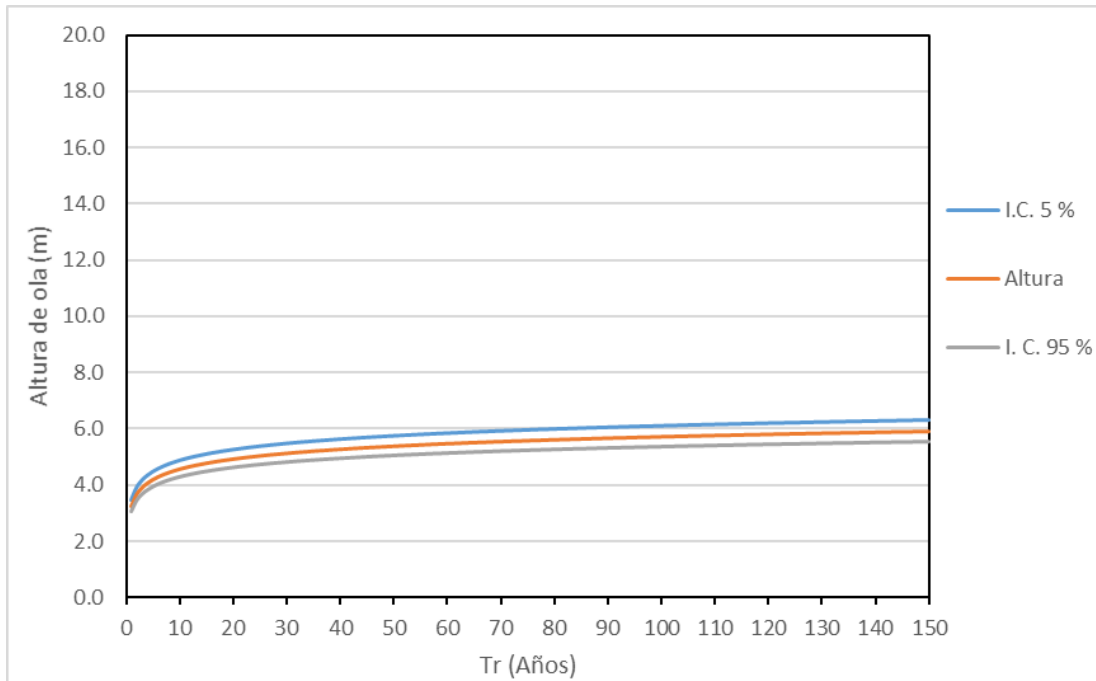


Figura A2.98 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 08

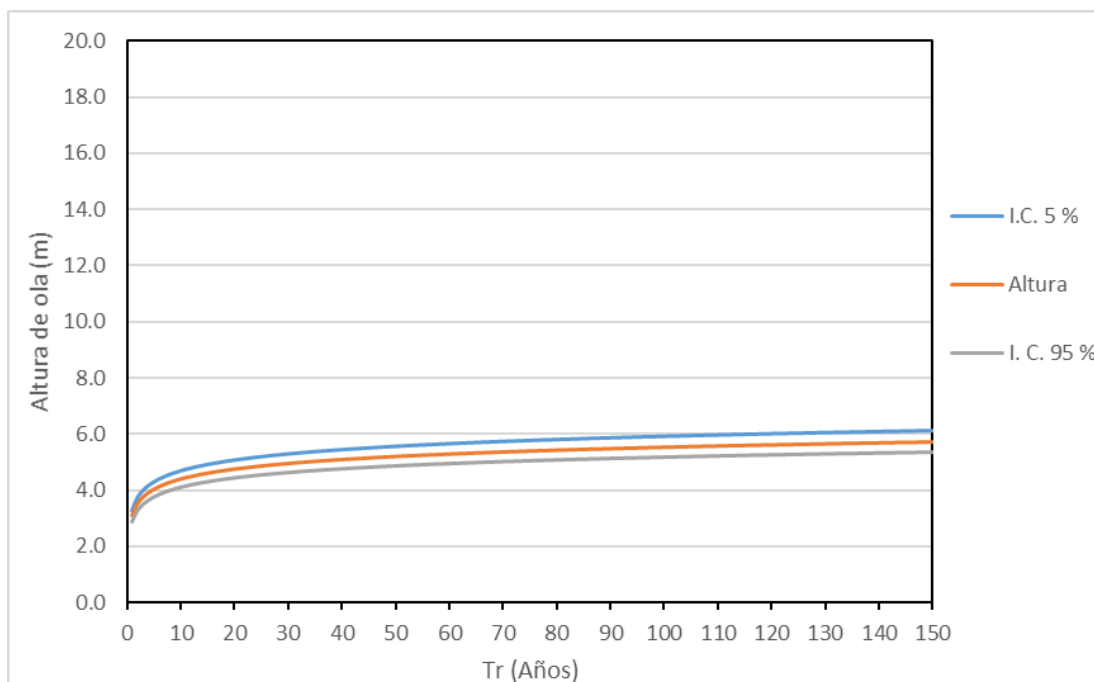


Figura A2.99 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 09

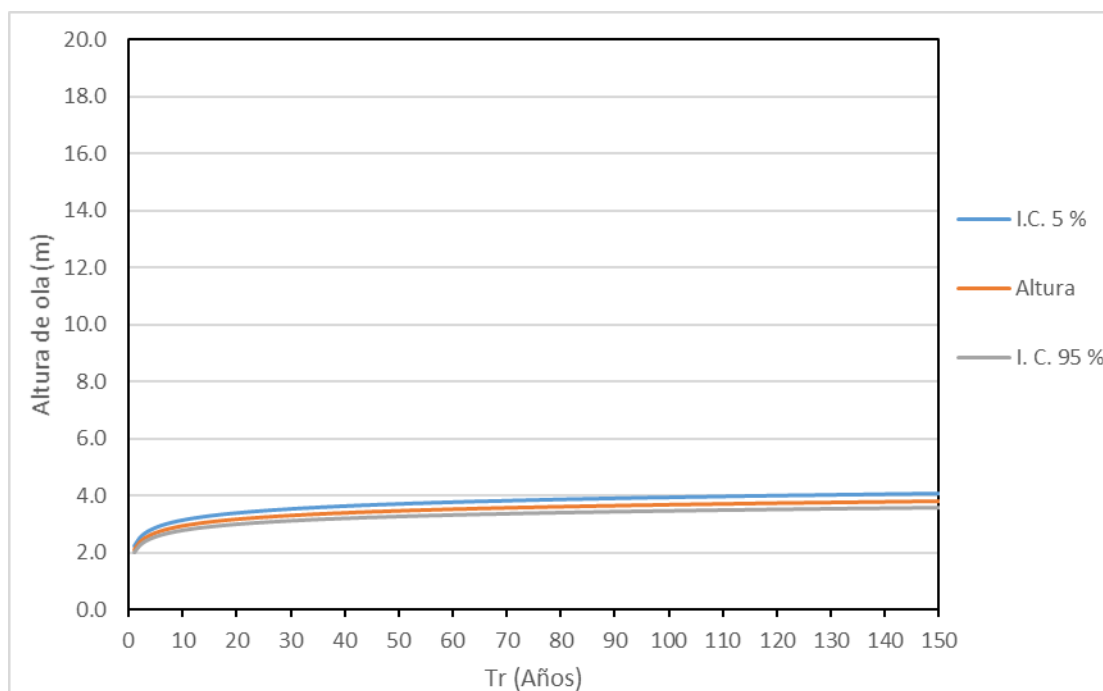


Figura A2.100 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=1.4$ en el punto 10

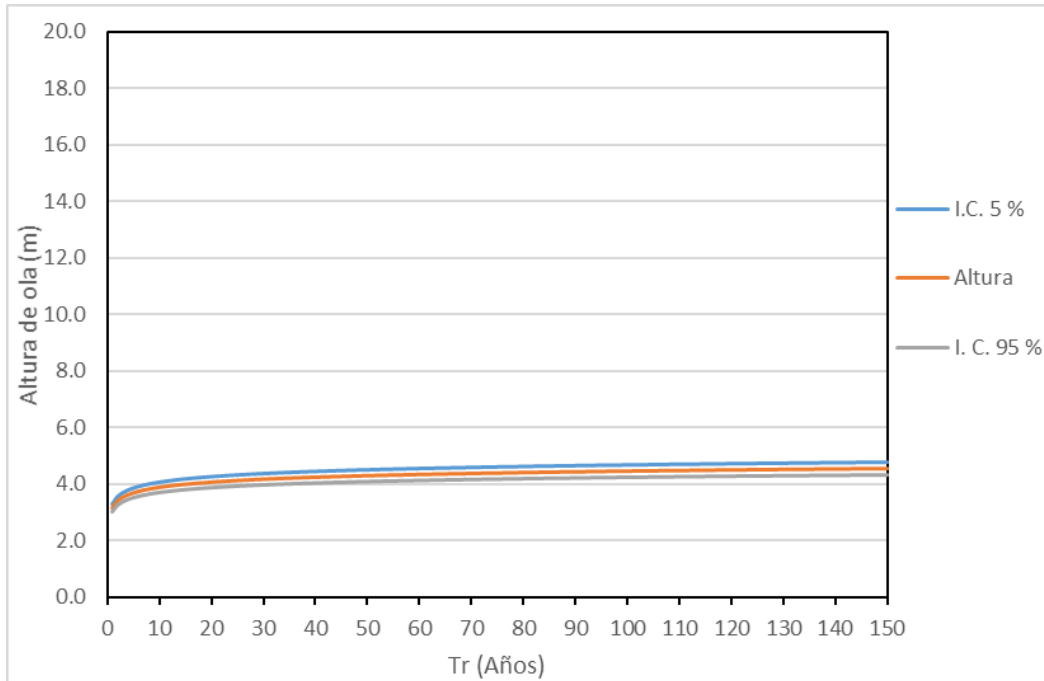


Figura A2.101 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=2.0$ en el punto 01

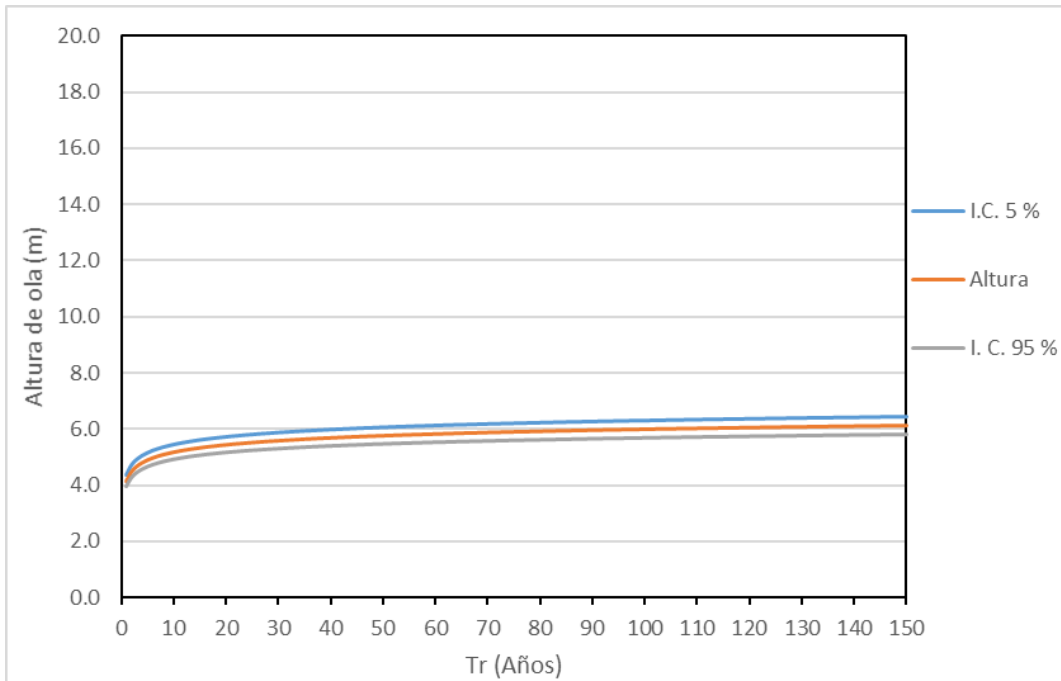


Figura A2.102 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=2.0$ en el punto 02

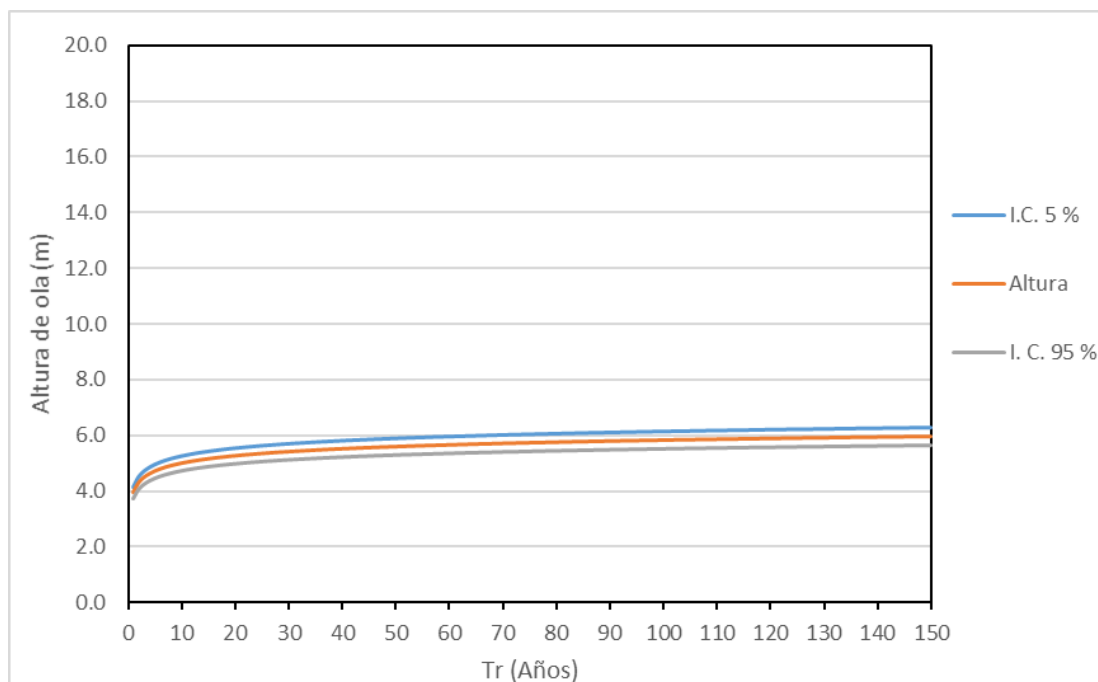


Figura A2.103 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=2.0$ en el punto 03

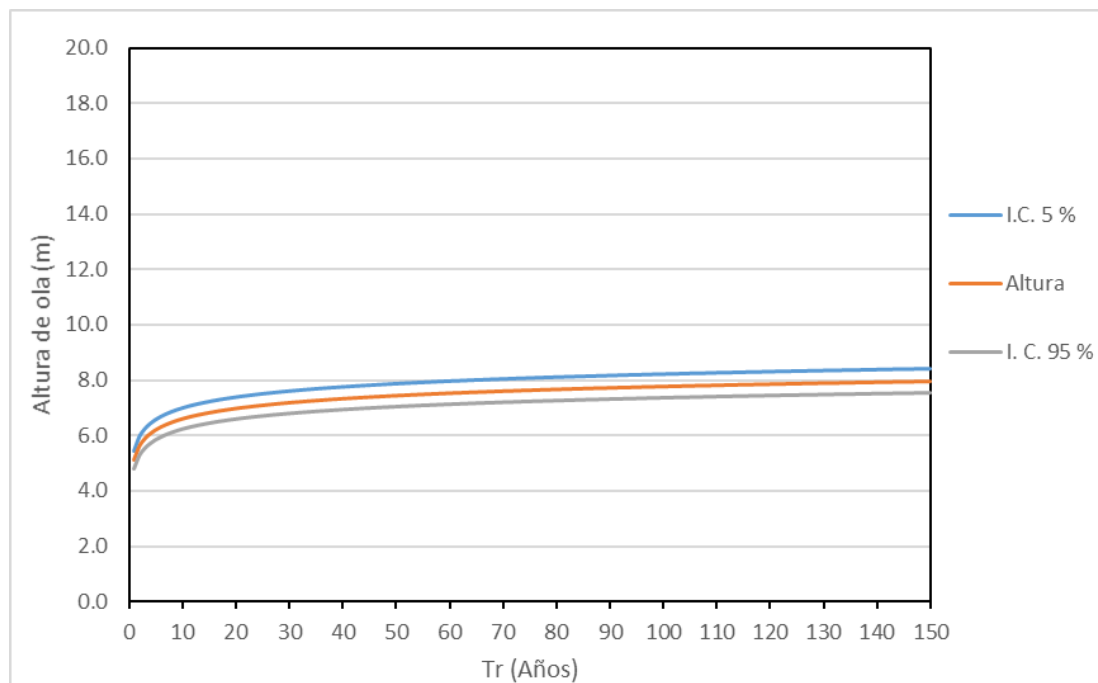


Figura A2.104 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k=2.0$ en el punto 04

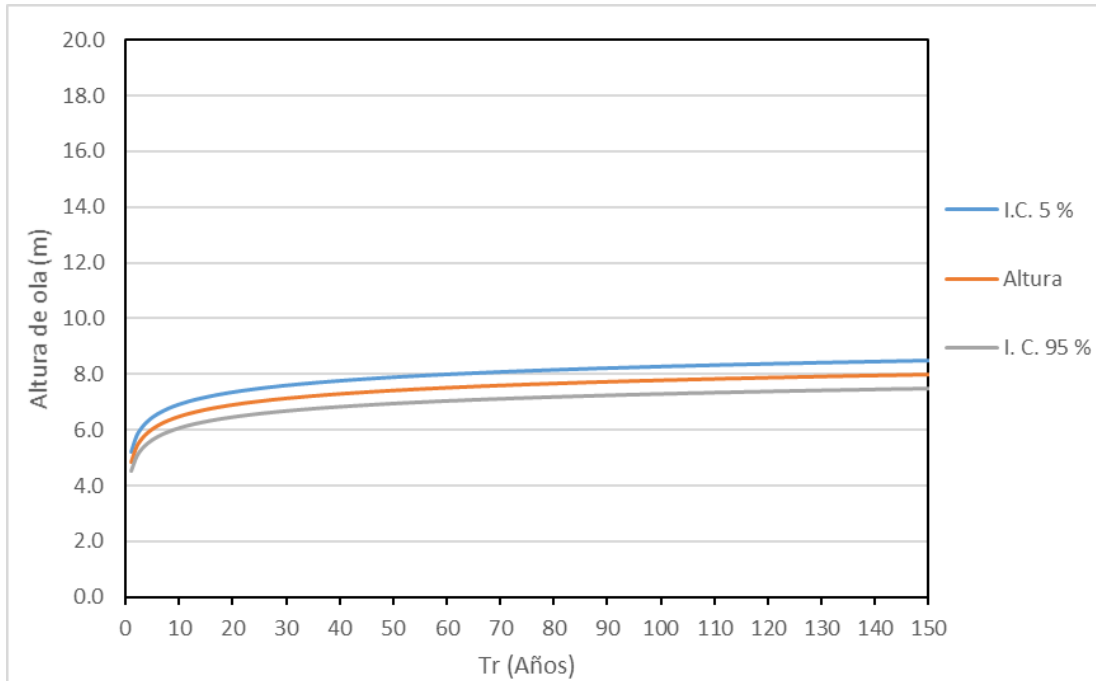


Figura A2.105 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 2.0$ en el punto 05

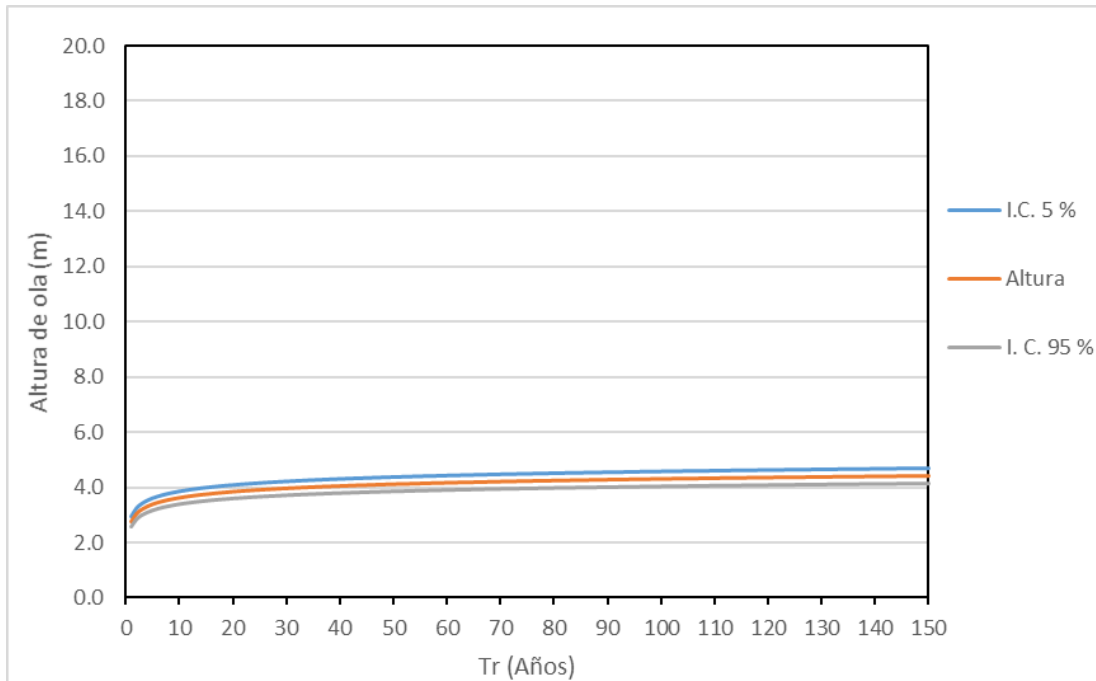


Figura A2.106 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 2.0$ en el punto 06

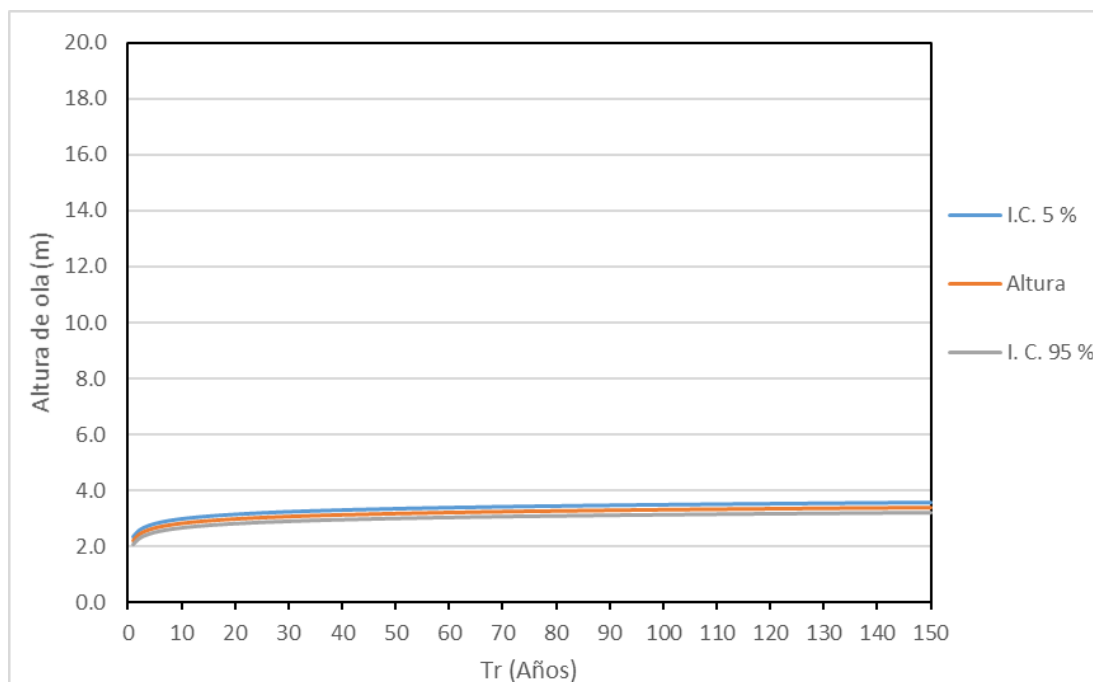


Figura A2.107 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 2.0$ en el punto 07

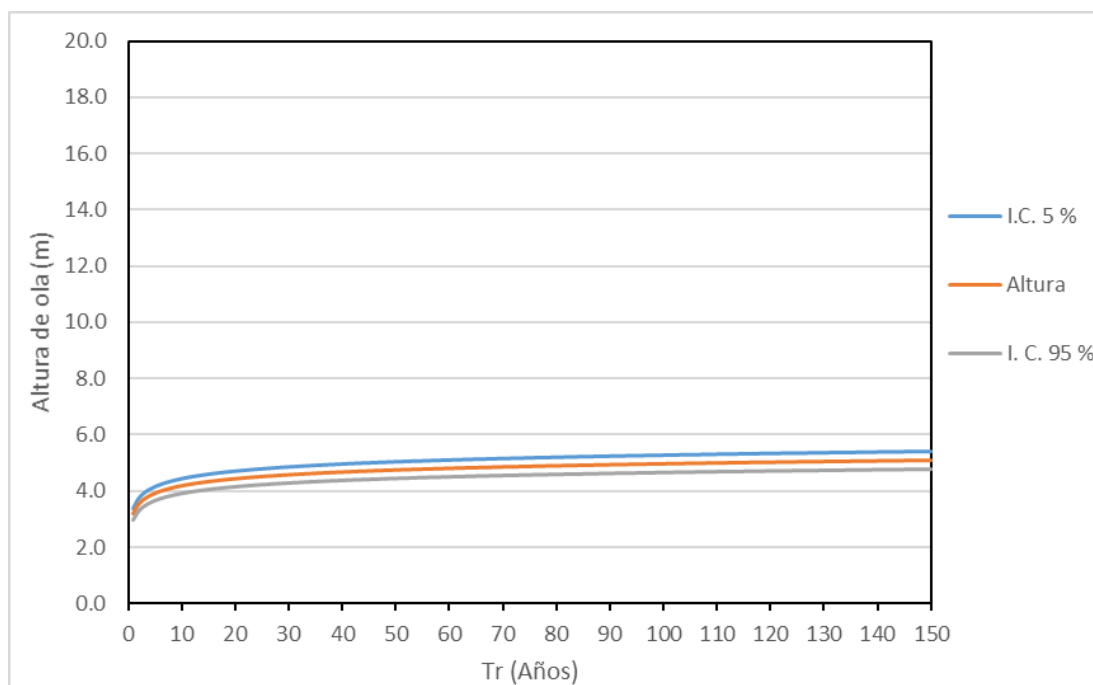


Figura A2.108 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 2.0$ en el punto 08

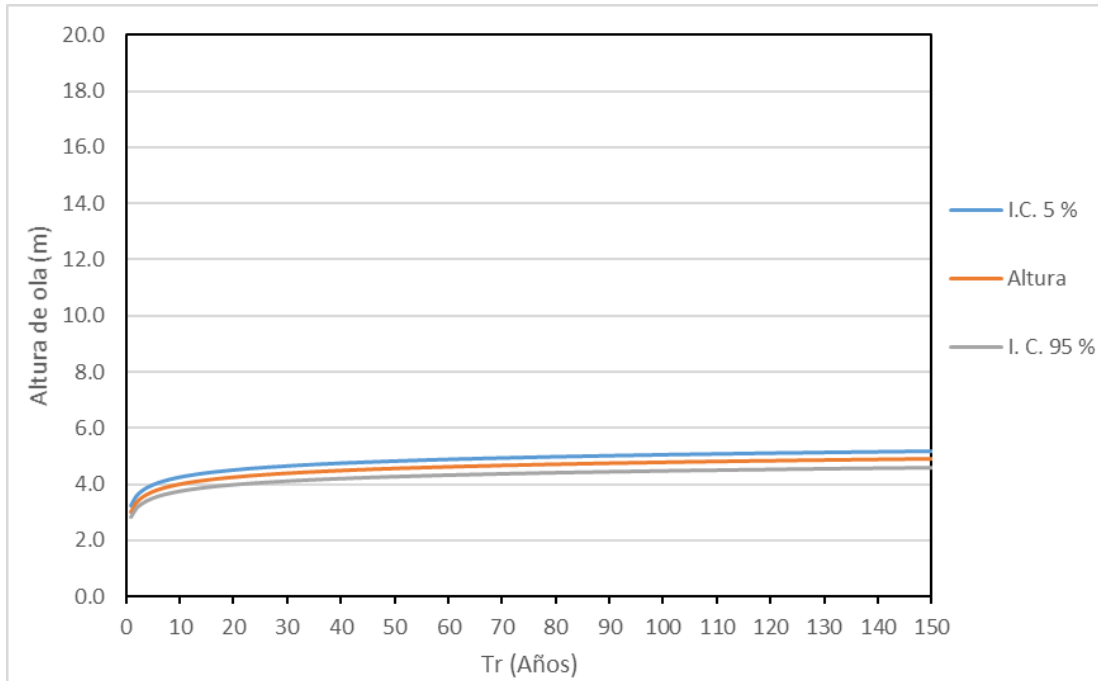


Figura A2.109 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 2.0$ en el punto 09

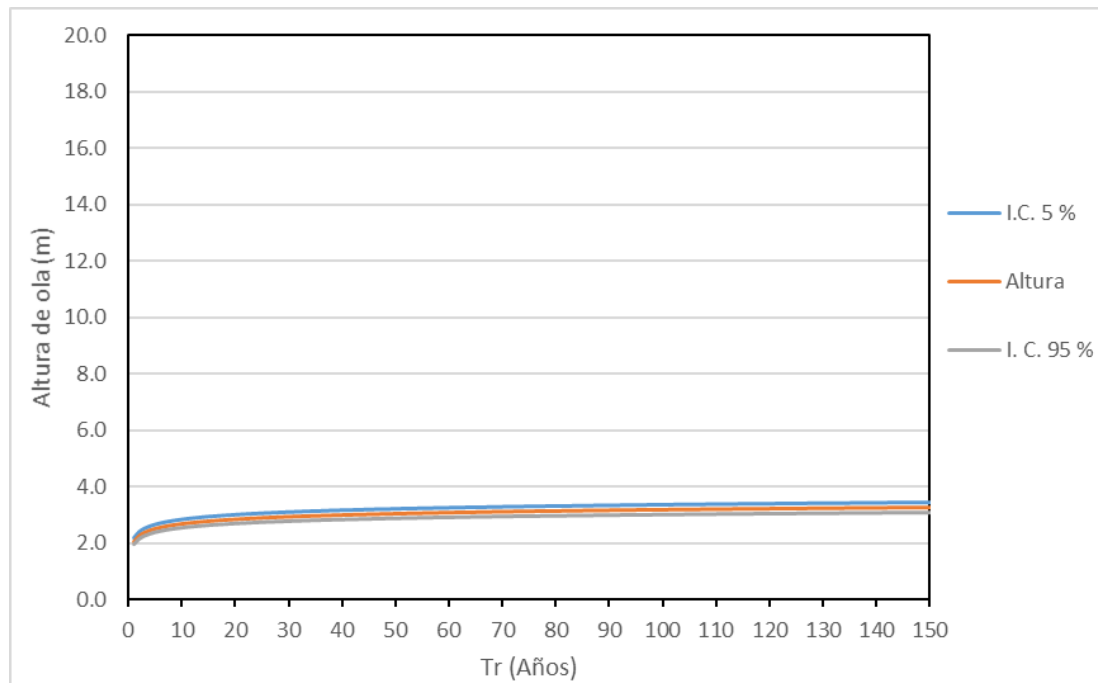


Figura A2.110 Alturas de ola vs períodos de retorno para la distribución Weibull con $k= 2.0$ en el punto 10



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>