



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA OPERACIONAL DE REBASE POR OLEAJE EN EL PUERTO DE TARIFA

Trabajo realizado por:

Francisco Canca Ortiz

Dirigido:

Gabriel Díaz Hernández

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería Costera y
Portuaria**

Santander, octubre de 2018

TRABAJO FINAL DE MASTER

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres por su dedicación, por su continuo apoyo y por creer en mí, sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

En segundo lugar, a mi tutor Gabriel Díaz por su atención y por su disponibilidad para resolver dudas. No quisiera olvidarme de los profesores del IH Cantabria por su gran profesionalidad en la docencia durante el Máster y aumentar mi interés y conocimientos en esta gran rama de la ingeniería civil.

ACTUALIZACIÓN DEL SISTEMA OPERACIONAL DE REBASE POR OLEAJE EN EL PUERTO DE TARIFA (CÁDIZ)

Autor: Francisco CANCA ORTIZ, Trabajo fin de Máster en Ingeniería de Costas y Puertos, convocatoria octubre 2018.

Tutor: Gabriel DÍAZ HERNÁNDEZ

RESUMEN

La implementación de sistemas operacionales de rebase en los puertos españoles constituye una herramienta de planificación y alerta, de gran importancia para las actividades económicas y comerciales. En este estudio se recoge la metodología a seguir para la materialización de un sistema de alerta ante eventos de rebase del oleaje sobre estructuras de protección portuaria. El método se fundamenta en el uso de formulaciones analíticas modificadas con base en ensayos numéricos, para el cálculo de parámetros de cada una de las secciones de interés.

El estudio se inicia con un trabajo de regionalización o downscaling de oleaje, empleando el método híbrido, de esta forma se obtiene el oleaje a pie de estructura. Para aportar fiabilidad a la regionalización, los datos propagados son comparados y calibrados direccionalmente con datos instrumentales (boya REDCOS de Puertos del Estado).

Con esta primera información histórica de forzamiento de rebase, se ha obtenido el régimen medio anual de rebase a lo largo del dique Sagrado Corazón (dique principal del puerto de Tarifa) mediante las formulaciones del manual para rebase sobre estructuras (Eurotop), con el objetivo de entender la repuesta de la estructura ante este tipo de eventos, visualizar los valores de caudales medios, porcentaje de olas rebasadas en un estado de mar y analizar la estacionalidad anual de los eventos de rebase.

Con respecto a las formulaciones de rebase en el puerto de Tarifa (Cádiz) se han adaptado a las características geométricas de dos tramos representativos de dos tipologías diferentes a lo largo del dique Sagrado Corazón. En cada una de ellas se obtiene las variables de: caudal medio de rebase (q) y el porcentaje de olas rebasadas por estado de mar (N_{ow}/N_w).

La adaptación se basa en la mejora de los coeficientes de fricción y oblicuidad de las formulaciones a través de experimentos numéricos controlados, haciendo uso de los modelos numéricos IH2VOF e IH2BOUSS respectivamente para cada coeficiente. Una vez obtenidas, las

formulaciones mejoradas se presenta una comparación de las series de rebase obtenidas en las formulaciones tradicionales y modificadas, se redactan unas conclusiones generales.

Una vez terminado el proceso de mejora y adaptación de las formulaciones, estas son validadas con datos instrumentales de rebase para finalmente ser integradas en un sistema operacional de rebase (forecast) que tiene como objetivo realizar la predicción con un intervalo de 72 horas. El forzamiento predictivo se toma del sistema de predicción de oleaje SAPO de Puertos del Estado.

Finalmente, el sistema de predicción es integrado en una arquitectura automatizada basada en códigos y funciones de MATLAB, realizando de forma automática toda la cascada de procesos necesarios para la generación de un informe final que integra datos de predicción de oleaje del régimen de rebase de los tramos seleccionados del dique Sagrado Corazón.

Palabras clave: Sistema operacional, rebase, caudal medio, olas rebasadas, modelo numérico, validación, Eurotop, regionalización, forecast.

PORT OF TARIFA (CÁDIZ) WAVE OVERTOPPING OPERATIONAL SYSTEM UPGRADE

Author: Francisco CANCA ORTIZ, Trabajo fin de Máster en Ingeniería de Costas y Puertos,
October 2018 call.

Directed by: Gabriel DÍAZ HERNÁNDEZ

ABSTRACT

Implementation plan of overtopping operational systems in Spanish ports represent an important planning and alert tool for economic and commercial activities. In this study the methodology for materializing an overtopping alert system over portuary structures is developed. The method is based on using modified analytic formulations obtained by numeric model tests for calculating parameters for each section of interest.

The study is started with a regionalization or downscaling of waves applying a hybrid method, by doing this, wave conditions at the structures are obtained. For providing feasibility to the regionalization, the propagated data are compared and calibrated with instrumental data (buoy REDCOS of Puertos del Estado).

With that initial historic information of wave conditions for overtopping, the annual mean overtopping throughout Sagrado Corazón's breakwater (principal breakwater of Tarifa port) through the equations of wave Overtopping of Sea Defenses and Related Structures assessment Manual (Eurotop), to understand the overtopping structure answer, view mean overtopping values, percentage of overtopping waves in a sea state and analyzing the seasonality overtopping events.

Regarding to overtopping equations in Tarifa port (Cádiz), geometric characteristics of two representative sections and different typology breakwaters throughout Sagrado Corazon's dike. For both, the following variables are obtained: mean overtopping discharge (q) and percentage of overtopping waves per sea state (N_{ow}/N_w).

The new adaptation is based on the improvement of the friction and obliquity coefficients of the overtopping equations through controlled numeric tests, using IH2VOF and IH2BOUSS respectively for each coefficient. Once modified formulae is gained, a comparison between overtopping series obtained with classic and modified equations are presented, therefore general conclusions are drafted.

Once finished the process of improvement and adaptation the new formulae, these are validated with instrumental overtopping data to finally incorporate them into an overtopping operational system (forecast) which aims to perform a prediction in a 72 hours interval. The wave conditions predicted are obtained from the forecast system of wave SAPO of Puertos del Estado.

Finally, operational system is integred in an automatical architecture based on MATLAB code and functions, performing the cascade of necessary process automatically for generating a full report of the overtopping regime in sections selected of the Sagrado Corazon's dike.

Key words: Operational system, overtopping, mean discharge, overtopping waves, numeric model, validation, Eurotop, regionalization, forecast.

Capítulo 1. Introducción

El transporte marítimo es el principal modo de modo de transporte empleado en el comercio internacional. A diferencia del transporte aéreo, por carretera o ferroviario, el marítimo permite enviar grandes cantidades de mercancía a un coste muy económico. El transporte aglutina más del 80% del comercio internacional de mercancías.

Los puertos con el tiempo se han convertido en ejes económicos y sociales más importantes de España, la cual es una de las naciones punteras por la situación estratégica de sus puertos y por la cantidad de pasajeros que mueve cada año. Las cifras de movimiento de personas y de mercancías van cada vez en aumento, esto se debe a la tendencia internacional de construir barcos cada vez de dimensiones mayores en aras de abaratar el coste de transporte.

A nivel social, los puertos también cumplen un objetivo en la ciudad tan importantes como la generación de empleo o las actividades recreativas que se pueden dar alrededor de él (por ejemplo, uso de playas o la pesca deportiva).

Los puertos pueden encontrarse en localizaciones donde los agentes atmosféricos pueden presentar comportamientos de altas energías, que afectan a la generación de oleaje y viento, muy nocivos para el desarrollo de las actividades anteriormente descritas. Por ello, es importante predecir esas condiciones climáticas y oceánicas para poder llevar a cabo medidas preventivas para detener actividades o tomar las decisiones adecuadas para que se sigan efectuando dichas actividades, pero con medidas preventivas.



Figura 1: Rebase sobre dique

En este escenario es donde se encuadran los sistemas operacionales. Mediante estos sistemas, se puede hacer un uso responsable del puerto y de las actividades que se realizan en su entorno.

Las aplicaciones de un sistema operacional pueden ser los siguientes:

- Diseño y conservación de infraestructuras
- Gestión y planificación operativa
- Asignación servicios técnico-náuticos
- Gestión tráfico marítimo y fondeaderos

Los sistemas operacionales pueden aportar información de predicción variada, tales como: oleaje, viento, agitación, rebase etc.... Concretamente el sistema de rebase del oleaje sobre estructuras de protección portuaria se centrará este estudio. Que consiste en obtener de forma predictiva las condiciones de oleaje a pie de estructura para posteriormente calcular el rebase mediante formulaciones semi-empíricas adaptadas a la geometría de cada sección.

Actualmente el puerto de Tarifa (Cádiz) forma parte del proyecto SAFEPORT que tiene como objetivo mejorar la gestión de riesgos océano-meteorológicos en entornos portuarios para que la Comunidad Portuaria pueda planificar y desarrollar su actividad de una manera más segura, eficiente y sostenible. Uno de los productos resultantes de este proyecto para el Puerto de Tarifa es un sistema operacional de predicción de viento, oleaje y rebase. Este último se muestra en una aplicación web (cuadro de mando ambiental), en él se dan de manera predictiva las condiciones de oleaje, viento y nivel del mar. Además, a través de la aplicación web se puede consultar la predicción de caudal de rebase, porcentaje de olas rebasadas, volumen medio de rebase, volumen máximo de rebase y el espesor medio de la lámina de agua. Existe la posibilidad de ver de forma cualitativa (mediante color, rojo o verde) la operatividad del dique Sagrado Corazón para peatones y vehículos. En la figura 2 se puede observar el esquema que se propone en ese sistema operacional.

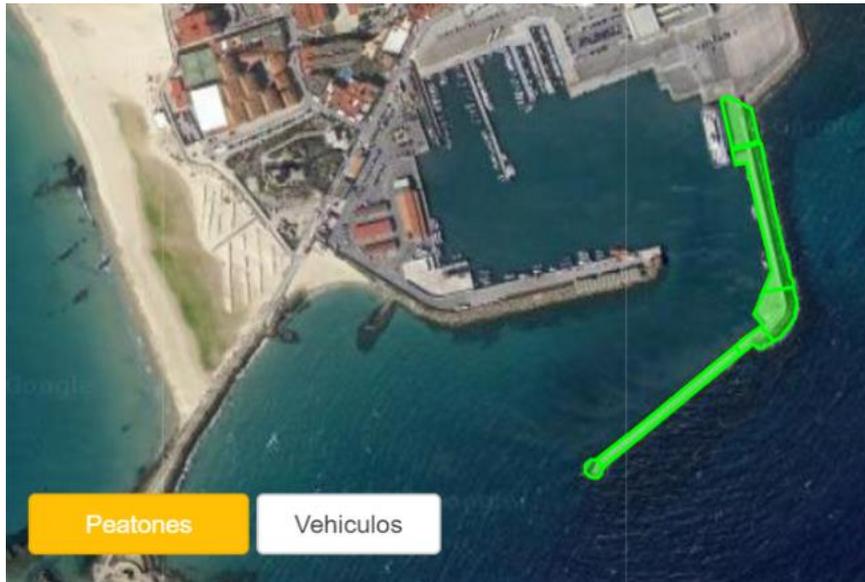


Figura 2: Esquema del sistema de predicción del Proyecto SAFEPORT

En este estudio se proponen las mejoras de las formulaciones de caudal medio de rebase y porcentaje de olas rebasadas. Para ello, se implementa:

- El efecto del periodo del oleaje sobre el rebase en el dique Sagrado Corazón.
- El efecto del aumento del nivel del mar debido a la configuración del Puerto mediante un modelo de Boussinesq.
- Implementación del tramo I (dique Sagrado Corazón) al sistema de predicción de rebase el cual en el actual sistema no se tiene en cuenta (siendo el tramo más vulnerable ante rebase de todo el dique).

Para realizar las formulaciones y tener en cuenta los procesos descritos, se estudian los tramos seleccionados del dique Sagrado Corazón en simulaciones con modelos numéricos para obtener formulaciones para cada una de ellas. Con ello, se mejora la fiabilidad de la respuesta de la estructura frente al rebase con respecto al actual, en el cual se emplean las formulaciones del manual Eurotop.

Capítulo 2. Objetivo del estudio

El objetivo principal de este estudio es la actualización de las expresiones de caudal medio de rebase y porcentaje de olas rebasadas sobre los tramos seleccionados del dique Sagrado Corazón obtenidas mediante ensayos numéricos controlados e implementarlas en un sistema operacional de rebase.

Para alcanzar el objetivo del estudio se llevan a cabo las siguientes tareas:

- Estudio de forma detallada de la estructura del puerto de Tarifa.
- Estudio del clima portuario del puerto de Tarifa.
- Estudio histórico (hindcast) de rebase sobre los diques seleccionados.
- Mejora de las fórmulas de rebase mediante ensayos numéricos con diferentes características.
- Diseño y arquitectura de un sistema automático de predicción de rebase (forecast) implementando las formulaciones obtenidas.

Capítulo 3. Metodología general

En este capítulo se presenta la metodología general para su implementación en cualquier estudio de esta índole. A continuación, se muestra un esquema de cajas y posteriormente la explicación del significado de cada una de ellas.

La metodología del estudio se divide en dos apartados: hindcast (estudio histórico) y forecast (sistema operacional). El primer apartado trata del estudio de las series históricas de rebase (figura 3) por oleaje y la obtención de las nuevas formulaciones y el segundo del diseño y la arquitectura de un sistema operacional de rebase (figura 4) para su aplicación.

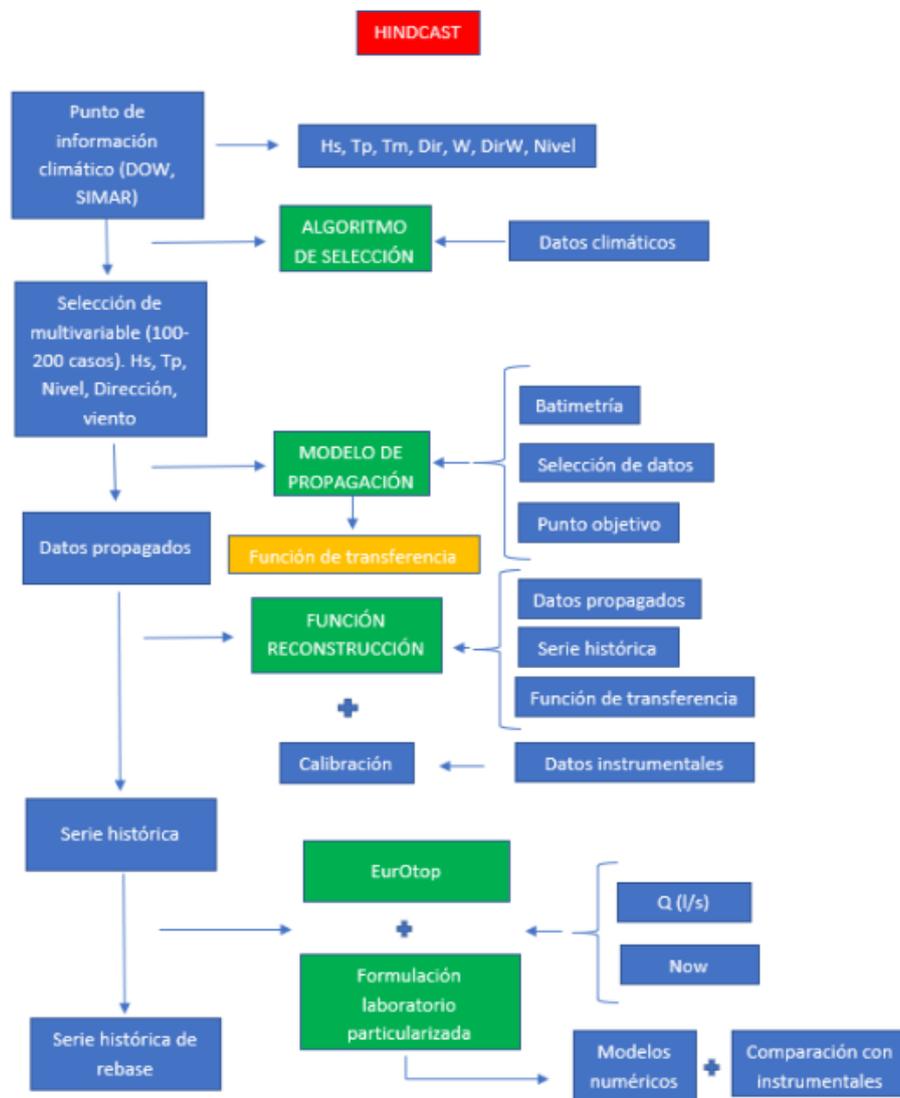


Figura 3: Metodología hindcast. Autor: Francisco Canca Ortiz (2018)

Para la realización del estudio histórico, lo primero es obtener las condiciones de oleaje y viento históricas en la zona objetivo de estudio. Para la elección del punto de información correcto para los datos de oleaje y viento, es necesario tener en cuenta que las coordenadas de su posición deben ser iguales que las del punto de predicción, ya que deben tener la misma localización para aplicar el mismo método de propagación.

Una vez obtenidas las variables fundamentales de oleaje, viento y nivel del mar (altura significativa, periodo pico, dirección del oleaje, velocidad del viento, dirección del viento y nivel del mar) se lleva a cabo la aplicación de un algoritmo de selección multivariable de datos. Su objetivo es seleccionar una serie de estados de mar representativos de las características del punto de información climático para la posterior propagación de estos hacia el punto a pie de estructura. Su aplicación se justifica por el ahorro computacional del proceso de propagación, disminuyendo el número de casos que se propagan significativamente. El producto resultante de aplicar la selección es la serie representativa de las condiciones de oleaje de las variables fundamentales descritas anteriormente.

Realizado el estudio de selección, se lleva a cabo la propagación. Para ello, son necesarios los siguientes datos:

- Batimetría de detalle
- Series de selección de datos obtenidas
- Coordenadas de los puntos a pie de dique y boya de datos cercana

Una vez implementados estos datos en el modelo de propagación seleccionado, se obtienen las condiciones propagadas de oleaje en los puntos objetivo. De esta manera, se obtiene también una función de transferencia que relaciona el punto de información climático con los puntos objetivo a pie de dique.

Posteriormente se realiza la reconstrucción de la serie histórica de oleaje a pie de dique a partir de la serie de casos representativos seleccionados mediante el algoritmo de selección y propagados por un modelo. Para ello se emplea una función de reconstrucción que se nutre de

los datos propagados, de la función de transferencia y de la serie histórica original, para que la función pueda establecer la serie completa propagada a pie de dique.

Tras la reconstrucción, se lleva a cabo un estudio de comparación y calibración direccional del oleaje con datos instrumentales (boya de oleaje). Tras esta comparación, se obtienen unos coeficientes que se aplican a la serie histórica de oleaje para una mejor definición de sus características.

Finalmente, obtenida la serie histórica calibrada de oleaje propagada a pie de dique, se aplican las formulaciones de rebase para obtener el régimen de rebase. Hay dos formulaciones posibles:

- Manual de rebase Eurotop: Formulaciones obtenidas a partir de ensayos de laboratorio en secciones tipo con una serie de características.
- Formulación particularizada para cada sección: Obtención de una formulación a partir de ensayos llevados a cabo en las secciones del dique objeto de estudio.

Una vez comparadas y validadas con los datos instrumentales, se selecciona la que mejor se ajuste para describir el rebase a lo largo de las secciones seleccionadas. Con la implementación de la formulación y su aplicación se obtiene la serie histórica de rebase a pie de estructura.

Una vez explicada la metodología para el estudio histórico, se presenta el esquema del forecast (sistema operacional) y la posterior explicación.

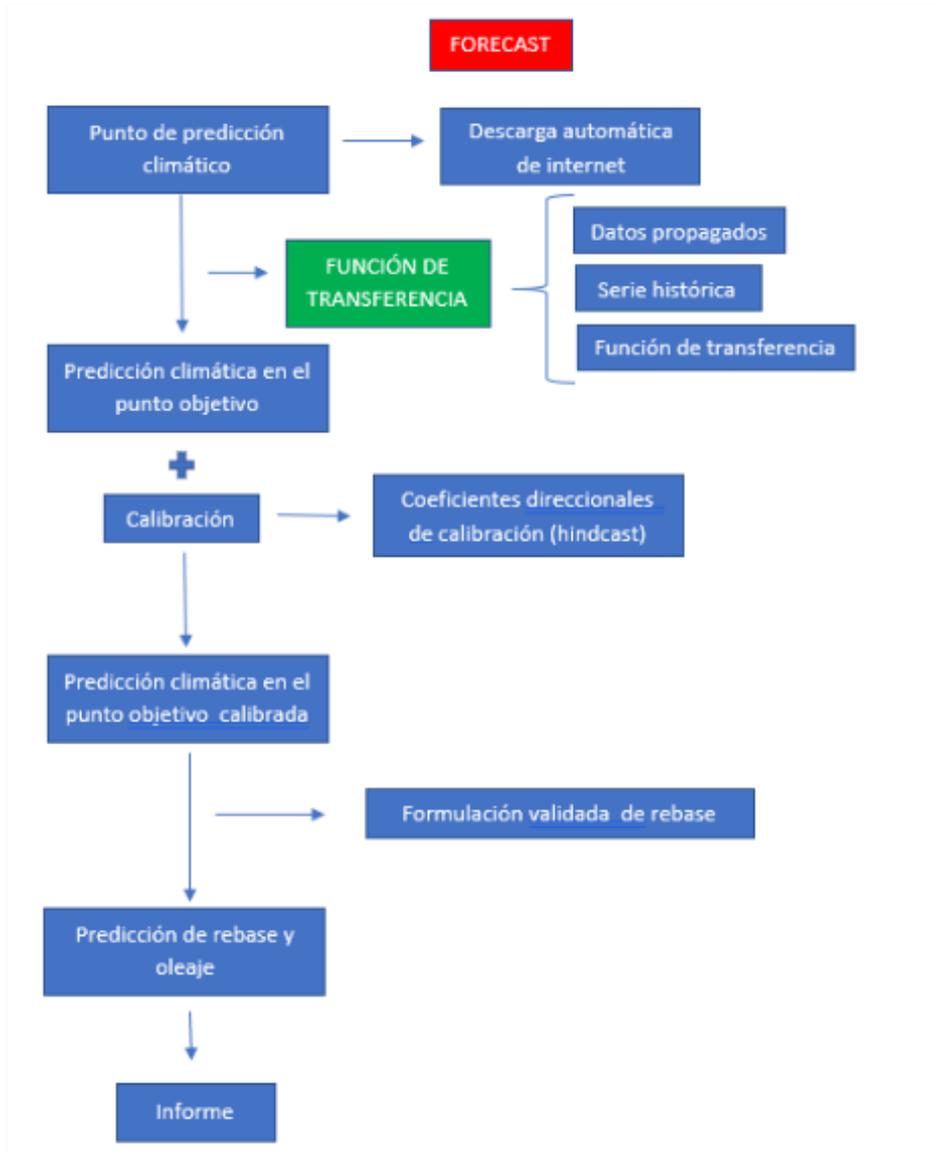


Figura 4: Metodología forecast. Autor: Francisco Canca Ortiz (2018)

El sistema de predicción de rebase (forecast) comienza la descarga de datos climáticos desde un proveedor que tenga disponibles datos de oleaje, viento y nivel del mar. Los datos descargados deben de contener las variables fundamentales del oleaje y viento para su correcta implementación.

Una vez obtenidos los datos de oleaje para un periodo de predicción determinado, se aplica la función de transferencia heredada del estudio histórico. Esta propaga los datos desde el punto

del proveedor climático hasta pie de estructura. En este proceso se incluyen los efectos de la propagación mencionados en el estudio histórico.

Tras obtener la serie horaria de las variables predichas propagadas al punto objetivo, se le aplican los coeficientes de calibración obtenidos en el estudio histórico. Se obtiene la serie predicha propagada y calibrada a pie de estructura.

Finalmente, se aplica la formulación que se seleccione tras el estudio histórico, para obtener el rebase sobre la estructura objetivo.

Al finalizar todos los procesos, se emplea un código automático para generar un informe de la predicción de rebase obtenida a través de las formulaciones aplicadas y de las condiciones de oleaje, viento y nivel del mar.

El estudio se organiza en los siguientes capítulos:

- Capítulo 3. CLIMA MARÍTIMO: En este capítulo se estudian las variables océano-climáticas para caracterizar la zona de estudio. Se presenta rosas, régimen medio y extremal de las variables: altura de ola (H_s), periodo pico (T_p), nivel del mar y viento.
- Capítulo 4. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS. En este capítulo se describe de forma general las actividades que se realizan y las características de las secciones de los diques que forman el puerto de Tarifa. Además, se describen los datos instrumentales que se han obtenido de la campaña de campo.
- Capítulo 5. ESTUDIO HISTÓRICO DE REBASE (HINDCAST): En este capítulo se desarrolla la metodología descrita en el capítulo 3 de forma detallada. Se realiza la propagación de datos, calibración y aplicación de las formulaciones del manual Eurotop a los tramos seleccionados y la primera validación de los datos obtenidos.

- Capítulo 6. FORMULACIÓN DE REBASE MODIFICADA: En este capítulo se desarrollan los experimentos llevados a cabo para la obtención de las fórmulas modificadas para las secciones seleccionadas, detallando los ensayos y sus características.
- Capítulo 7. VALIDACIÓN: En este capítulo se validan los datos de rebases obtenidos al aplicar las fórmulas obtenidas en el capítulo anterior sobre los oleajes medidos con los datos instrumentales que estos oleajes producen realmente sobre la estructura.
- Capítulo 8. SISTEMA DE PREDICCIÓN DE REBASE (FORECAST): En este capítulo se desarrolla el diseño y la arquitectura del sistema operacional de rebase en las secciones seleccionadas del dique.
- Capítulo 9. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: En este capítulo se exponen las conclusiones del estudio y las futuras líneas de investigación.
- Capítulo 10. REFERENCIAS: En este capítulo se exponen las referencias que se han utilizado en este estudio para su realización.

Capítulo 4. Clima marítimo

En este apartado se presenta un análisis del clima marítimo de la zona del puerto de Tarifa (Cádiz). En él se dispone la información necesaria para caracterizar las variables más importantes de cálculo para el estudio.

Bajo esta premisa, el conocimiento imprescindible de las características del oleaje susceptible de incidir en la costa objeto de estudio, y de las oscilaciones sufridas por el nivel del mar como consecuencia, tanto de la atracción gravitatoria del sistema tierra-luna-sol (marea astronómica), como de las condiciones climatológicas (marea meteorológica).

Además, como agente climático adicional, se procede a la caracterización del régimen de vientos en la zona.

Así, el presente capítulo climático tiene por objeto la identificación de las distintas fuentes de información oceanográfica disponibles, la selección de entre ellas, de las más adecuadas para su empleo en el presente estudio y la definición de los parámetros de diseño asociados al oleaje, el viento, y la marea.

4.1) Fuentes de datos

4.1.1) Datos numéricos (reanálisis)

Los datos utilizados (figura 5) para realizar este informe son los que siguen:

- Base de datos de oleaje propagado hasta la costa denominada DOW 1.1 desarrollada en IH Cantabria (Downscaled Ocean Waves, Camus *et al.* 2013), con una duración de más de 60 años (1948- 2015), con una resolución temporal horaria y una resolución espacial de entre 50m y 200m.
- Base de datos GOS 1.1 (Global Ocean Surges) desarrollado por IH Cantabria, comprende el reanálisis de marea meteorológica de un periodo de 60 años (1948-2015)

- Base de datos GOT (Global Ocean Tides).
- Coordenadas punto DOW: latitud 35.98 y longitud -5.60.



Figura 5: Posición de los datos del estudio

4.1.2) Datos instrumentales (Boya REDCOS)

El conjunto de datos REDCOS está formado por las medidas procedentes de la Red de Boyas Costeras de Puertos del Estado.

Las boyas de esta red se caracterizan por estar ubicadas en las proximidades de instalaciones portuarias, estando fondeadas a menos de 100 m de profundidad. En la mayoría de los casos, las medidas están perturbadas tanto por el perfil de la costa, como por los efectos del fondo sobre el oleaje, por lo que son representativas, únicamente, de condiciones locales. Esta red está compuesta por boyas escalares de tipo Waverider y boyas direccionales de tipo Triaxys.

- Boya de Tarifa (2009): Las coordenadas de la boya son Longitud 5. 59° O y 36° N con una cadencia de 60 minutos. La fecha inicial de fondeo fue el 21-04-2009 desplazada 200 metros al este el 22/04/2014.

4.2) Caracterización del oleaje de reanálisis

4.2.1) Caracterización estadística

Altura de ola (H_s)

El análisis de la distribución sectorial del oleaje permite determinar las direcciones significativas de los oleajes susceptibles de afectar al tramo litoral objeto de estudio.

En la figura 6 se puede observar la serie temporal de oleaje en el punto de reanálisis elegido en las coordenadas anteriormente descritas.

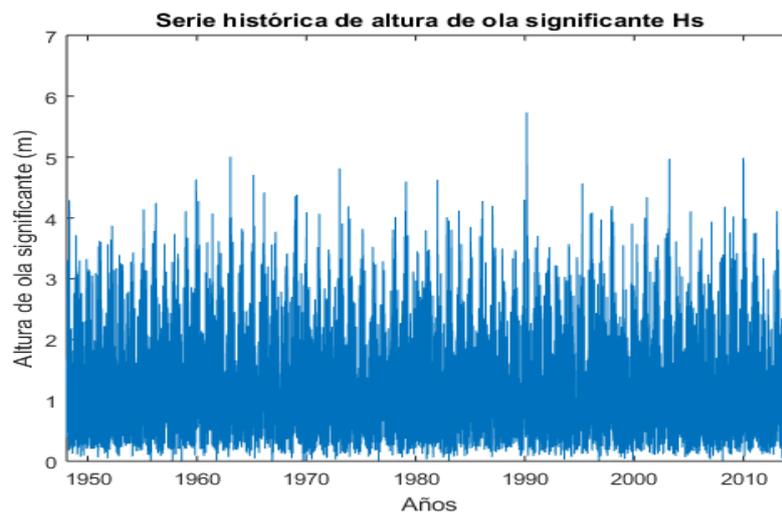


Figura 6: Serie histórica de la altura de ola significativa H_s (m)

Como se puede observar de manera aproximada, el oleaje se concentra en una media de 1-2 metros en esta zona de la costa de Andalucía con picos de temporales de 3-4 metros y con máximos como del año 1990 de casi 6 metros.

En la figura 7 se representa la relación de las direcciones medias de las olas con su altura de ola y en la figura 8 la estacionalidad de la altura de ola a lo largo del año y cómo varía esta.

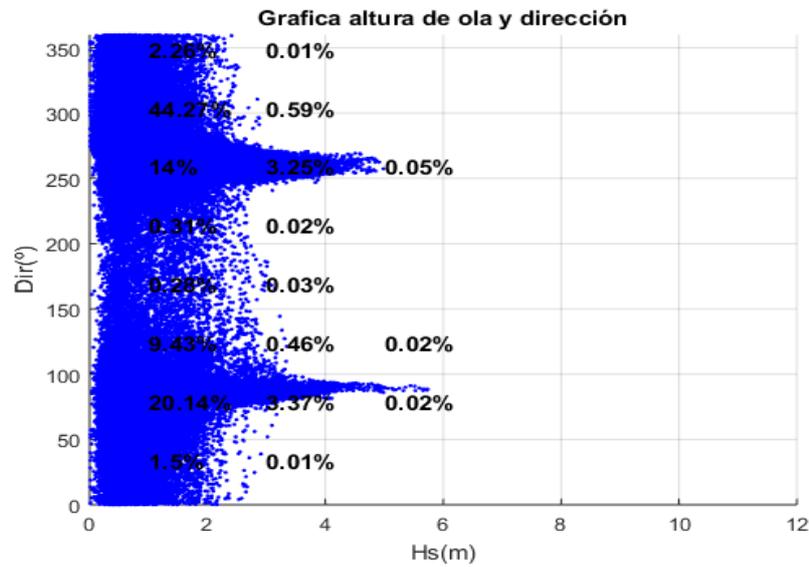


Figura 7: Relación dirección media-altura de ola significativa

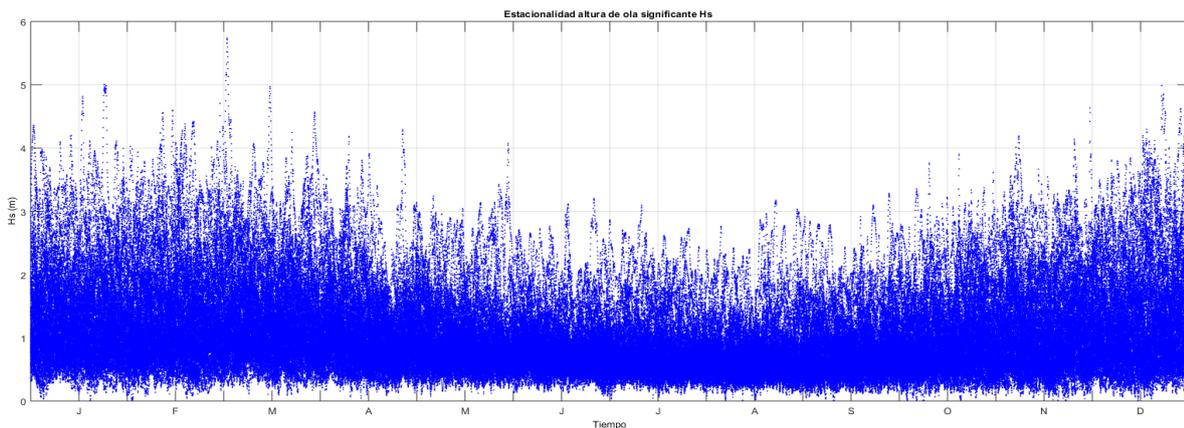


Figura 8: Altura de ola mensual

Las direcciones predominantes de oleaje son el este y el oeste, es decir, los oleajes de levante y poniente tan característicos de la zona. En la figura 7 se puede obtener la procedencia de los temporales con las alturas de ola mayores, estas son 250 y 90 grados que corresponde a las direcciones este (E) y WSW (Oeste suroeste).

En la figura 8 se puede observar la distribución de la altura de ola a lo largo del año, concentrándose los temporales que pueden llevar a rebase sobre el puerto en los meses de diciembre a marzo.

Las rosas de oleaje son las siguientes:

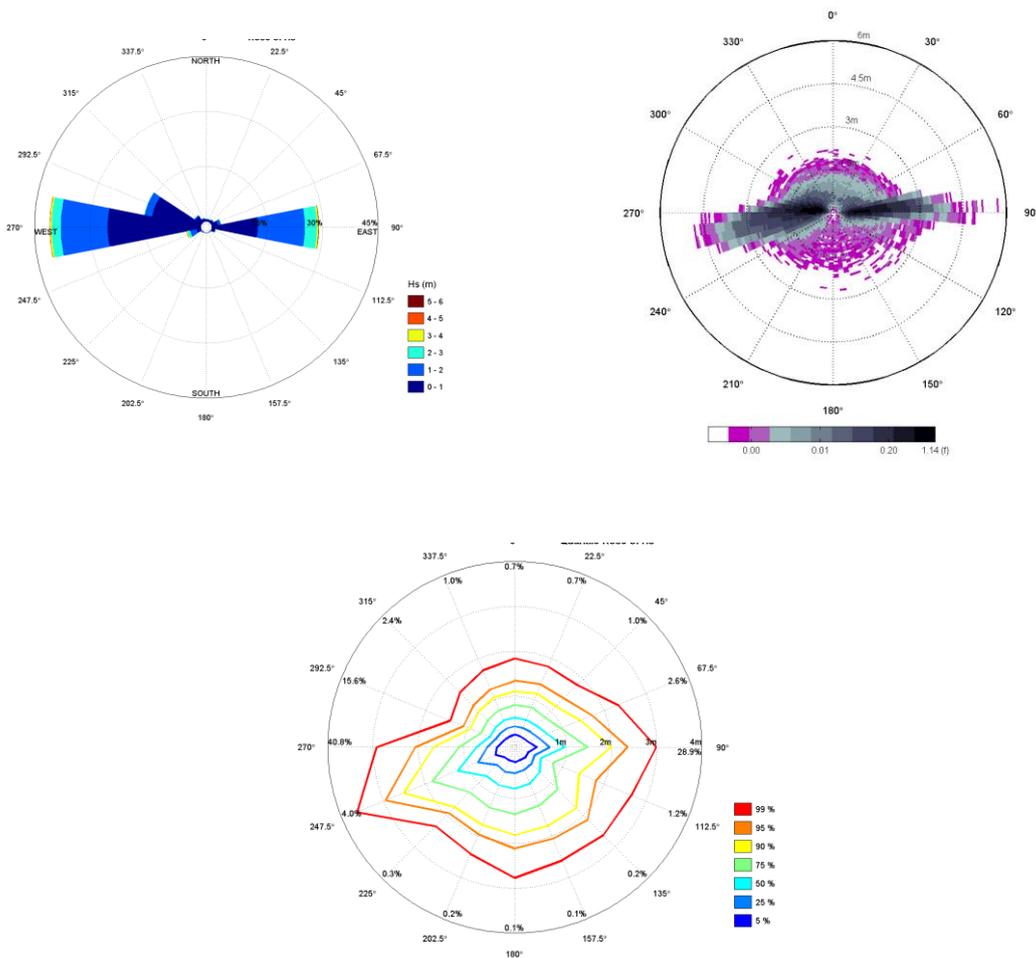


Figura 9: Rosas de oleaje

Según las rosas direccionales de la figura 9, se puede observar que el oleaje viene de todas las direcciones. Los oleajes tanto del sur o del norte que son los menos probables, son debido a oleaje generado localmente y a los oleajes reflejados de ambas costas de Tarifa y de Marruecos.

Periodo pico (T_p)

Análogamente se representa la distribución sectorial del periodo de pico del oleaje por direcciones.

En la figura 10 se observa que los periodos más largos se concentran en la dirección oeste, oleaje que entra en el estrecho de Gibraltar procedente del Océano Atlántico. También se aprecian periodos largos en la dirección Este porque en la parte Mediterránea ya que tiene "fetch" para que se forme oleaje.

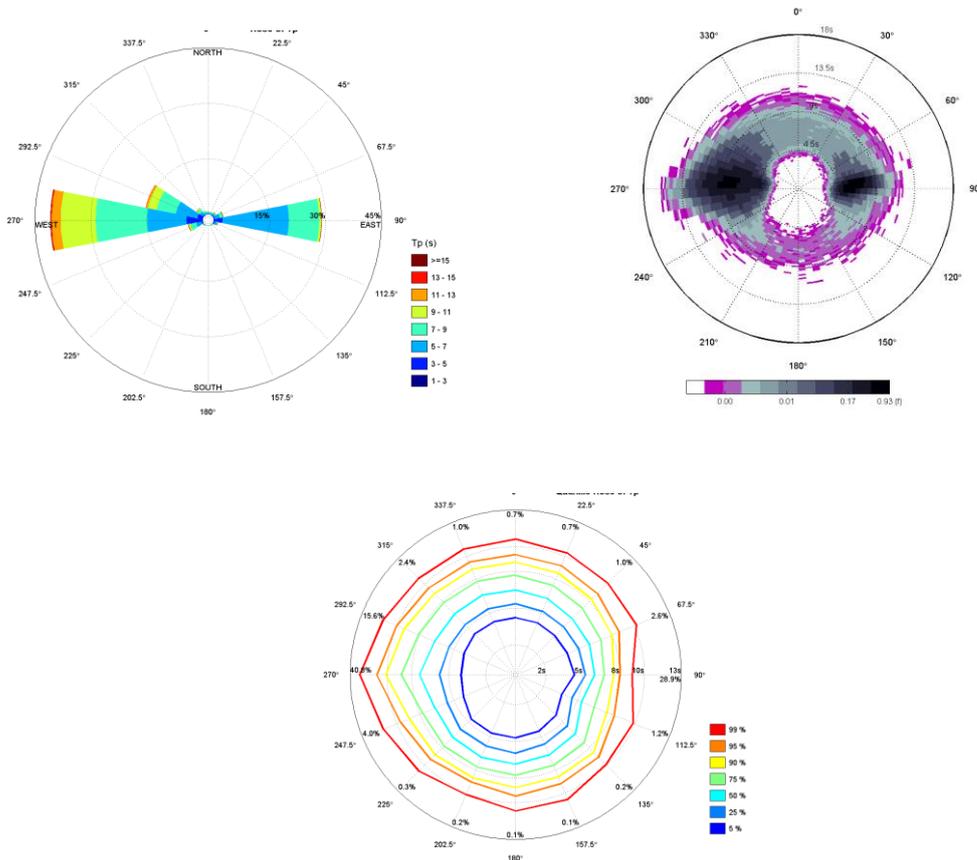


Figura 10: Rosas de periodo de oleaje

En los siguientes gráficos estadísticos tipo boxplot se muestran la distribución del periodo y de la altura de ola mensual y por direcciones.

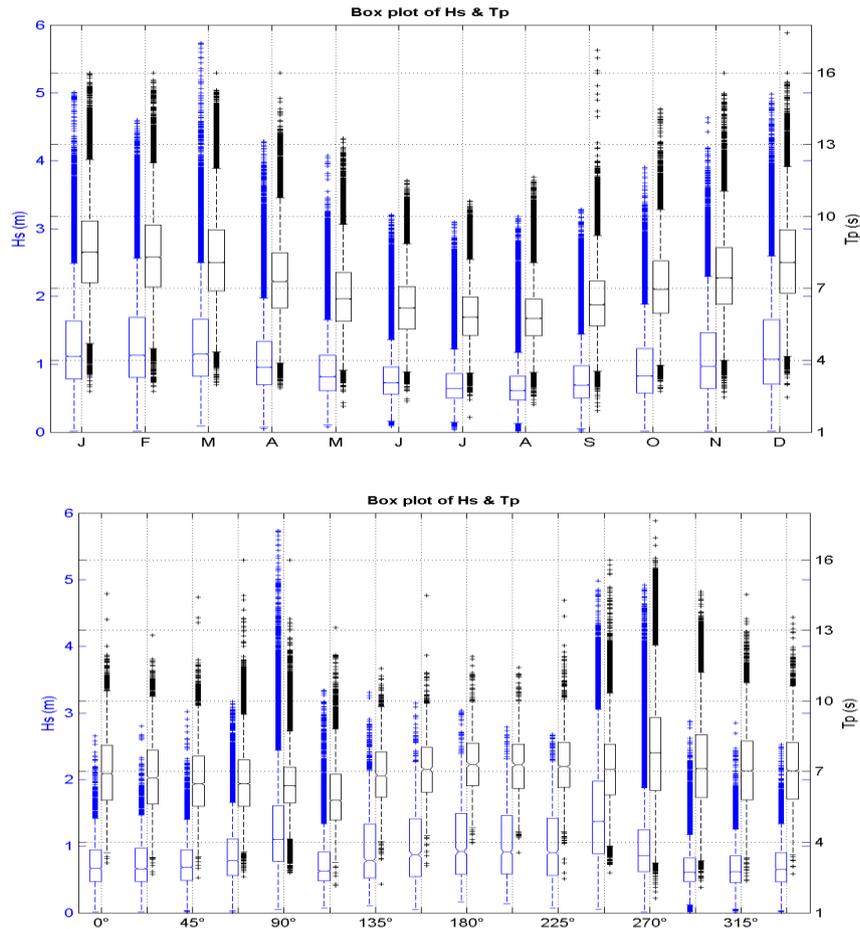


Figura 11: Gráficos estadístico tipo boxplot de altura de ola significativa y periodo pico

La media de altura de ola en meses de invierno es de 1 metro y en los meses de verano de 0,60 metros. Como se puede observar en la figura 11, en invierno las colas de máximos son mucho mayores que en los de verano llegando a máximos de 4-5 metros. ´

Por otro lado, las direcciones E y WSW se concentran las colas de máximos de altura de ola y periodo.

4.2.2) Régimen medio escalar

Se entiende por régimen medio una función que da la probabilidad de superación de cada valor de una variable.

El objetivo principal de este análisis es reproducir las condiciones más frecuentes o reinantes del oleaje en el año climático medio, para lo cual se ajustan los datos de H_s y T_p a una serie de funciones de distribución a fin de encontrar la que mejor represente su comportamiento.

Se obtiene los valores de altura de ola significativa de la serie de oleaje del área de estudio se distribuyen acorde a una función GEV (ecuación 1), tal que:

Función de distribución GEV

$$F(x; \mu, \psi, \xi) = e^{-(1 + \xi(\frac{x-\mu}{\psi}))^{-1/\xi}} \quad \text{Eq (1)}$$

$$x = \{H_s, T_p\}$$

En la figura 12, se muestra el régimen medio de la altura de ola significativa y el periodo pico.

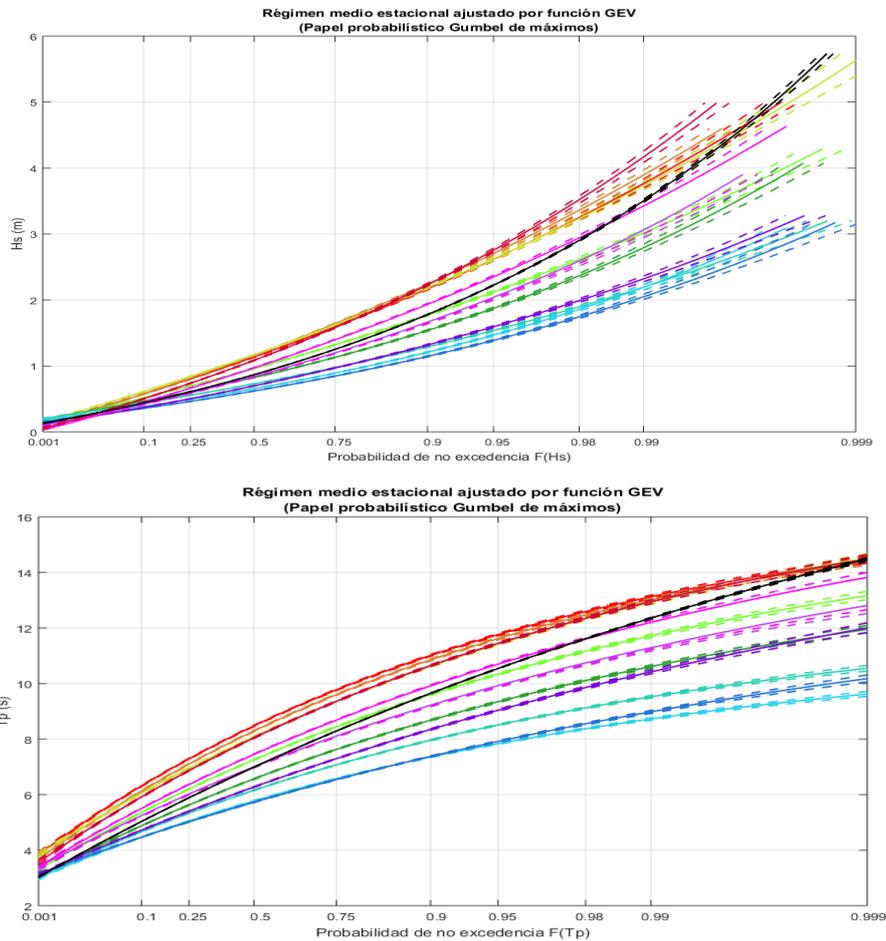


Figura 12: Régimen medio mensual de la altura de ola significativa y periodo pico

Mes	μ	ψ	ξ	%
E	0.101	0.479	0.958	8.435
F	0.100	0.500	0.977	7.804
M	0.095	0.475	0.993	8.562
A	0.098	0.378	0.820	8.286
M	0.160	0.306	0.708	8.562
J	0.123	0.252	0.636	8.286
J	0.168	0.234	0.568	8.435
A	0.152	0.227	0.535	8.435
S	0.122	0.280	0.594	8.163
O	0.134	0.361	0.701	8.435
N	0.104	0.444	0.805	8.163
D	0.144	0.501	0.898	8.435
Anual	0.196	0.372	0.728	100.000



Mes	μ	ψ	ξ	%
E	-0.192	1.720	7.869	8.435
F	-0.186	1.724	7.682	7.804
M	-0.151	1.635	7.503	8.562
A	-0.155	1.522	6.716	8.286
M	-0.148	1.357	6.083	8.562
J	-0.173	1.194	5.736	8.286
J	-0.173	1.046	5.405	8.435
A	-0.118	1.020	5.361	8.435
S	-0.106	1.262	5.822	8.163
O	-0.144	1.412	6.479	8.435
N	-0.141	1.570	6.887	8.163
D	-0.164	1.704	7.439	8.435
Anual	-0.096	1.596	6.418	100.000

A continuación, se muestra el gráfico de la relación H_s-T_p ajustada con una función polinómica de grado 3. Se puede observar en la figura 13 un crecimiento de periodo acompañado con un crecimiento de la altura de ola, definiendo de manera buena los máximos, pero hay mucha dispersión de datos en periodos más cortos.

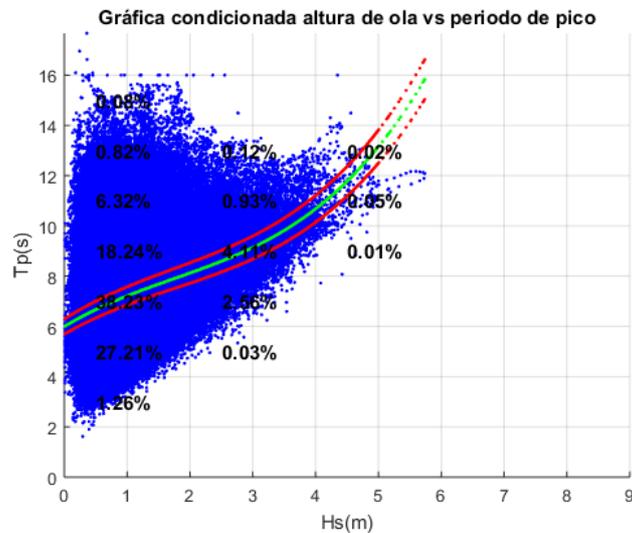


Figura 13: Relación altura de ola –periodo pico

$$p(x) = p_1 x^n + p_2 x^{(n-1)} + \dots + p_n x + p_{(n+1)}$$

p_1	p_2	p_3	p_4
0.0695	-0.3642	1.5165	5.9917

Tabla 1: Valor de coeficientes de ajuste H_s-T_p

4.2.3) Régimen medio direccional

El régimen medio sectorial se representa en la figura 14:

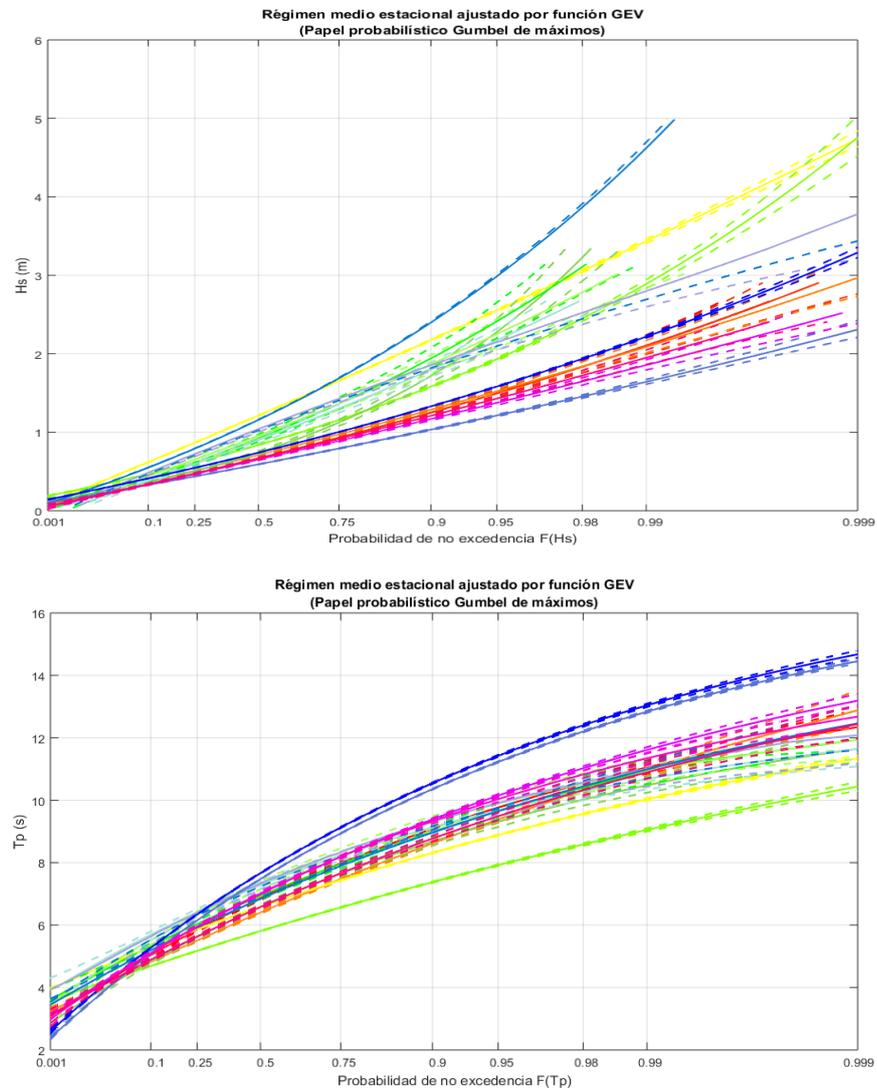
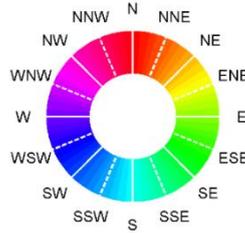


Figura 14: Régimen medio direccional de altura de ola significativa y periodo pico

Sector	μ	ψ	ξ
N	0.076	0.280	0.567
NNE	0.076	0.280	0.563
NE	0.049	0.287	0.604
ENE	0.022	0.496	1.031
E	0.161	0.319	0.717
ESE	0.322	0.335	0.611
SE	0.225	0.395	0.684
SSE	0.151	0.442	0.757
S	0.078	0.436	0.795
SSW	0.069	0.436	0.737
SW	-0.059	0.456	0.858
WSW	0.170	0.525	0.959
W	0.089	0.278	0.637
WNW	0.046	0.221	0.510
NW	0.027	0.266	0.552
NNW	0.041	0.274	0.565



Sector	μ	ψ	ξ
N	-0.163	1.457	6.338
NNE	-0.121	1.363	6.086
NE	-0.076	1.298	5.934
ENE	-0.107	1.051	6.211
E	-0.073	0.916	5.476
ESE	-0.177	1.396	6.086
SE	-0.135	1.298	6.469
SSE	-0.207	1.396	6.797
S	-0.193	1.261	6.834
SSW	-0.214	1.347	6.758
SW	-0.127	1.329	6.360
WSW	-0.174	1.912	6.984
W	-0.176	1.916	6.793
WNW	-0.140	1.520	6.451
NW	-0.170	1.525	6.474
NNW	-0.121	1.363	6.086

4.3) Caracterización extremal del oleaje

Para obtener el oleaje extremo en aguas profundas se ha analizado estadísticamente la serie de datos de 1948 a 2014 mediante el método clásico de selección de valores extremos de máximos anuales, ajustando la serie a la función de distribución biparamétrica Gumbel de máximos, y a la función de distribución triparamétrica General de Valores Extremos (GEV), con la finalidad de analizar la conveniencia de utilizar una u otra distribución.

En la figura 15 se muestra el ajuste obtenido de la variable altura de ola significativa máxima anual del registro escalar de datos a la función de distribución GEV.

Función de distribución GEV

$$F(x; \mu, \psi, \xi) = e^{-\left(1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\psi}\right)\right)^{-1/\xi}} \quad \text{Eq (2)}$$

$$x = \{H_s, T_p\}$$

μ	ψ	ξ
0.7294	0.3729	0.1959

Tabla 2: Parámetros de ajuste extremal GEV

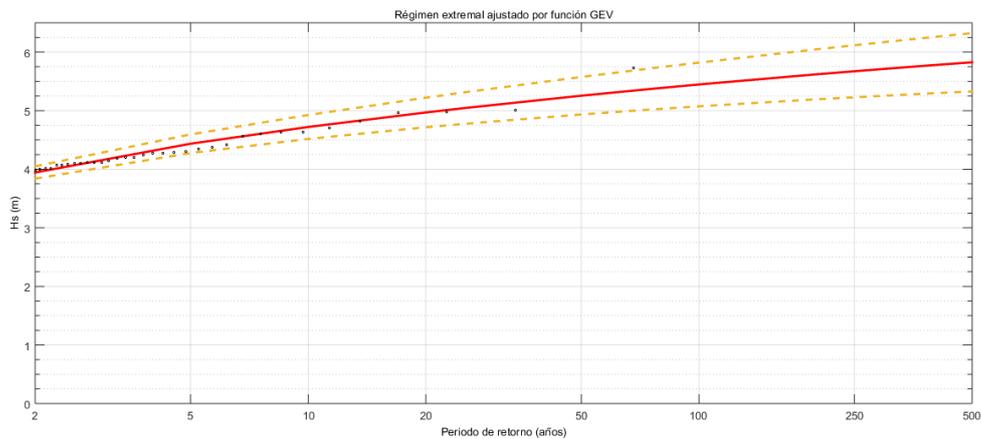


Figura 15: Régimen extremal de oleaje

Período de retorno	2	5	10	20	25	50	75	100	200	300	400	500
Altura de ola (m)	2.8216326	3.32725501	3.67260854	4.0072193	4.11378175	4.44289819	4.63463286	4.77048111	5.09745821	5.28862637	5.42425	5.52944816

Tabla 3: Alturas de ola y periodos de retorno del régimen extremal de oleaje

4.4) Nivel del mar

El nivel de marea, marea total o nivel del mar, NM, se obtiene como suma de las variables marea astronómica (MA), componente determinista de la marea resultante de la atracción gravitatoria del sistema tierra-luna-sol, y marea meteorológica (MM), componente aleatoria reflejo de las condiciones de presión atmosférica reinantes, tal que: $MA+MM=NM$.

En la tabla 4 se puede observar la media del nivel del Mar en el mareógrafo de Tarifa.

Mes Month	Nivel Medio Mean Level (cm)	Nivel Máximo Max. Level (cm)	Día del Máximo Max. Level Date	Nivel Mínimo Min. Level (cm)	Día del Mínimo Min. Level Date
Ene./Jan.	61	145	31	-18	2
Feb./Feb.	56	141	1	-22	2
Mar./Mar.	59	147	31	-29	1
Abr./Abr.	67	150	2	1	28
May./May.	67	142	17	-3	29
Jun./Jun.	66	142	16	2	14
Jul./Jul.	67	148	14	2	14
Ago./Aug.	68	145	12	-8	12
Sep./Sep.	72	155	9	-5	11
Oct./Oct.	75	154	9	6	8
Nov./Nov.	79	158	28	-3	7
Dic./Dec.	66	139	4	-10	25

Tabla 4: Niveles medios registrados por el mareógrafo de Tarifa (Cádiz)

La pleamar máxima viva equinoccial es de 1,88 metros sobre el nivel de referencia que en este estudio será la bajamar viva equinoccial (BMVE). En las siguientes figuras 16 y 17 se observa la serie temporal del nivel del mar histórica referenciada a la BMVE.

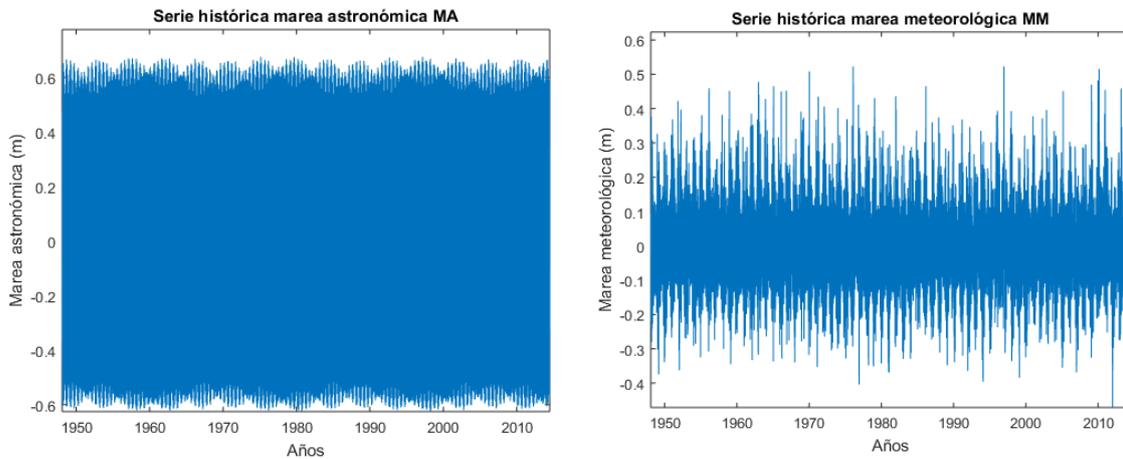


Figura 16: Series históricas de marea astronómica y meteorológica (reanálisis)

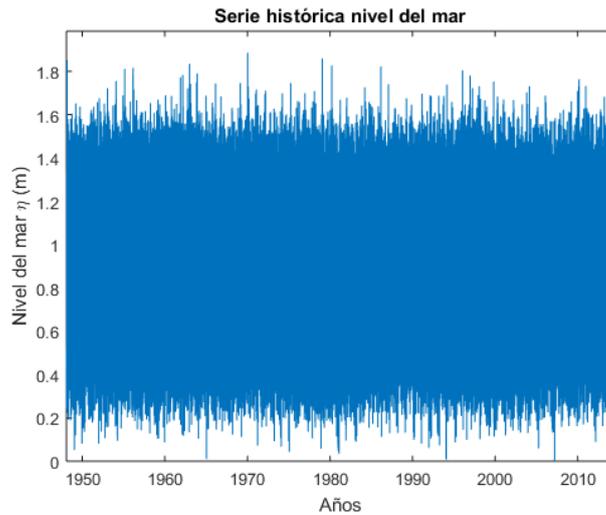
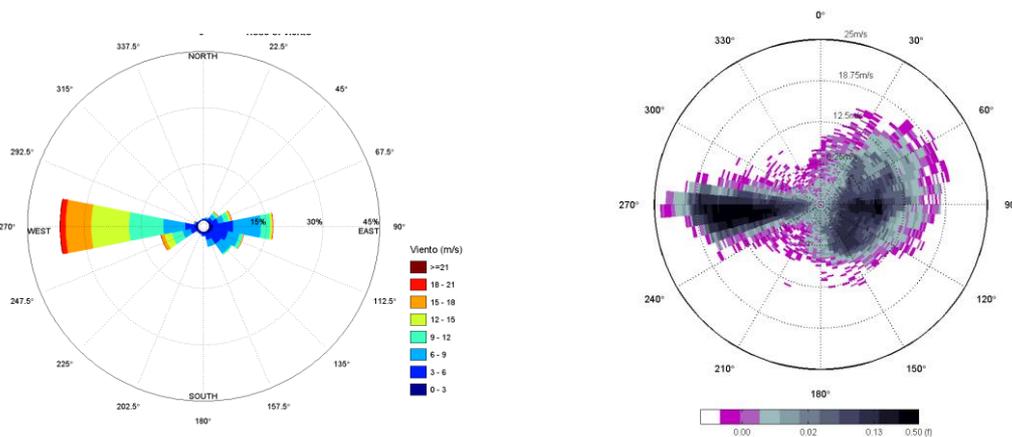


Figura 17: Serie histórica nivel del mar de Tarifa (Cádiz)

4.5) Régimen de viento

La representación de la rosa de vientos expuesta en la figura 18 permite identificar la dualidad en la frecuencia de presentación de los vientos de E y W, sectores dominantes a lo largo de la serie histórica, destacando por su mayor intensidad las componentes ENE y WSW.



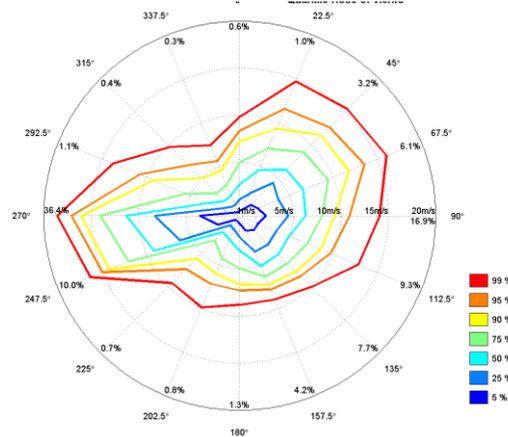


Figura 18: Rosas de viento

Este régimen de viento se corresponde con las mismas direcciones del régimen de oleaje, con lo cual, el viento es un gran aliciente en la formación de oleaje en la zona.

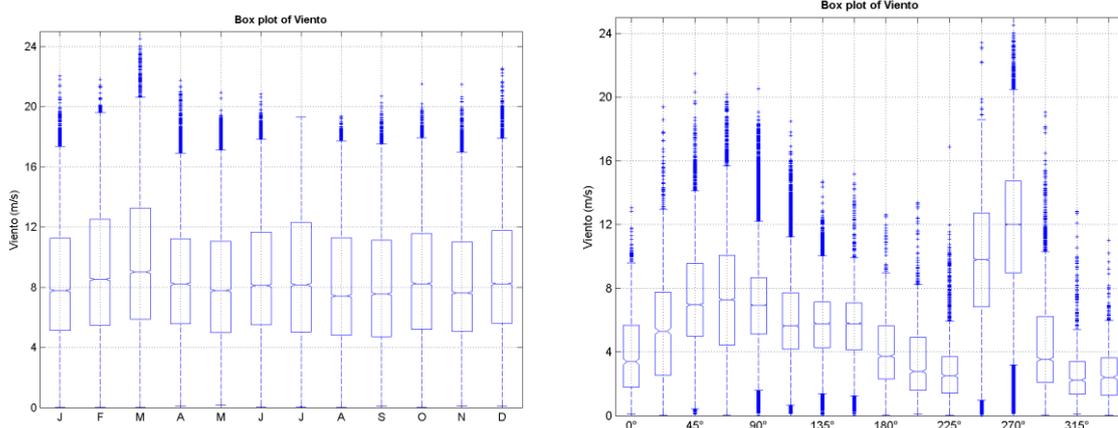


Figura 19: Gráfico estadístico tipo boxplot del régimen de viento

En la izquierda de la figura 19, la velocidad del viento es constante durante prácticamente todo el año. Pero como se puede observar en la derecha de la figura 19, los vientos medios más altos se concentran en la dirección correspondiente al oeste (W).

El régimen medio de la variable del viento se ajusta mediante una función Weibull de mínimos. A continuación, se muestra el ajuste con gráficos de probabilidad en las figuras 20 y 21.

$$f_T(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\} \quad \text{Eq (3)}$$

β	η
2.060	9.658

Tabla 5: Parámetros de ajuste régimen medio viento

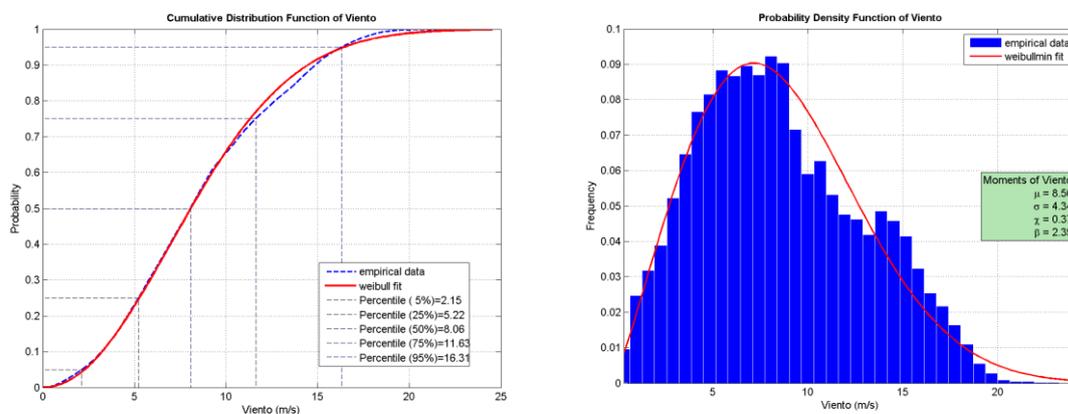


Figura 20: CDF y PDF de la variable viento

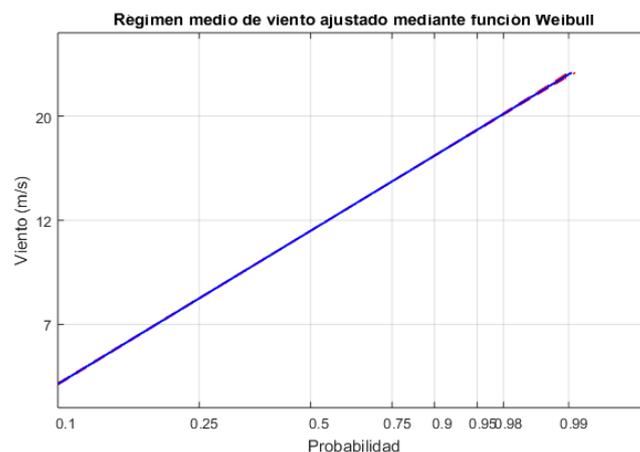


Figura 21: Régimen medio viento

El resultado del ajuste de los valores máximos anuales del régimen extremal del viento entre 1989 y 2009 mediante la función de distribución triparamétrica de mejor ajuste GEV, así como sus parámetros de localización (μ) y escala (Ψ), se presentan en la Figura 22.

Función de distribución GEV

$$F(x; \mu, \psi, \xi) = e^{-(1 + \xi(\frac{x-\mu}{\psi}))^{-1/\xi}}$$

$$x = \{H_s, T_p\}$$

Eq (4)

μ	ψ	ξ
6.7764	3.9013	-0.1471

Tabla 6: Parámetros de ajuste régimen extremal de viento

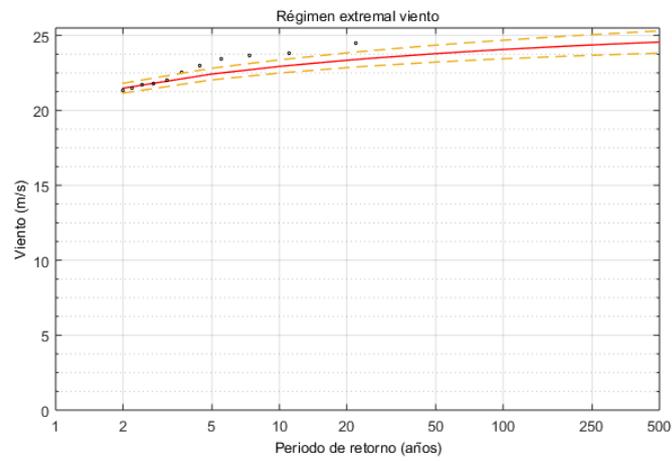


Figura 22: Régimen extremal de viento

Capítulo 5. Descripción y análisis de datos

En este capítulo del estudio se explica de manera detallada la geometría de la obra de protección principal del puerto de Tarifa (Cádiz). Se presentan datos relacionados como la configuración geométrica del puerto, la batimetría de la que se dispone y los datos instrumentales disponibles para realizar la validación de los futuros ensayos.

5.1) Descripción puerto de Tarifa (Cádiz)

El puerto de Tarifa es de vital importancia para España ya que se encuentra a escasos 16,5 km del continente africano. Su principal actividad es precisamente el turismo derivado de los ferris con destino a Tánger y al resto de Marruecos.

La localización geográfica en la que se centra este estudio para la actualización del sistema operacional es Tarifa (Cádiz). Su situación y su configuración geométrica se muestra en la figura 23.



Figura 23: Situación y disposición geométrica Puerto Tarifa (Cádiz)

El puerto de Tarifa posee la categoría de puerto de interés general, con una cantidad total de 50 amarres. Tiene un calado de 8 metros en las zonas más profundas y permite atracar barcos de

una eslora de 25 metros. Las dársenas que dan servicios a los barcos se muestran en la figura 24.

- Dique Sagrado Corazón ●
- Zona comercial ●
- Dársena pesquera ●
- Muelles de ribera ●



Figura 24: Disposición de las dársenas del puerto

Los tramos de los diques que forman el puerto tienen la siguiente disposición (figura 25):

- 1) Dique de la dársena pesquera. Este dique protege la dársena pesquera del puerto, su tipología de dique es en talud y tiene una longitud de 240 metros.
- 2) Dique de la dársena comercial. Pertenece a la prolongación del dique de Sagrado Corazón. Se divide en dos tramos que se denotan como el tramo I. La tipología de ambos tramos de dique es en talud y la longitud es de 179 metros,
- 3) Dique Sagrado Corazón: Se trata de un dique mixto, es decir, hay un tramo de dique en talud y otro de tipología vertical. En total posee una longitud de 490 metros.



Figura 25: Diques en el Puerto de Tarifa

Para una correcta identificación, se distribuyen los diques en los siguientes tramos (información recogida del proyecto SAFEPOR) como se muestra en la figura 26.



Figura 26: Nombrado de diques según Proyecto SAFEPOR

- Tramo I (Dique en talud) ●
- Tramo II (Dique en talud) ●
- Tramo III (Dique en talud) ●
- Tramo IV (Dique en talud) ●
- Tramo V (Dique en talud) ●
- Tramo VI (Dique en talud) ●
- Tramo VII (Dique vertical) ●
- Tramo dársena pesquera (dique talud) ●

Una vez realizada la descripción de las estructuras que forman el puerto, se analiza la batimetría proporcionada.

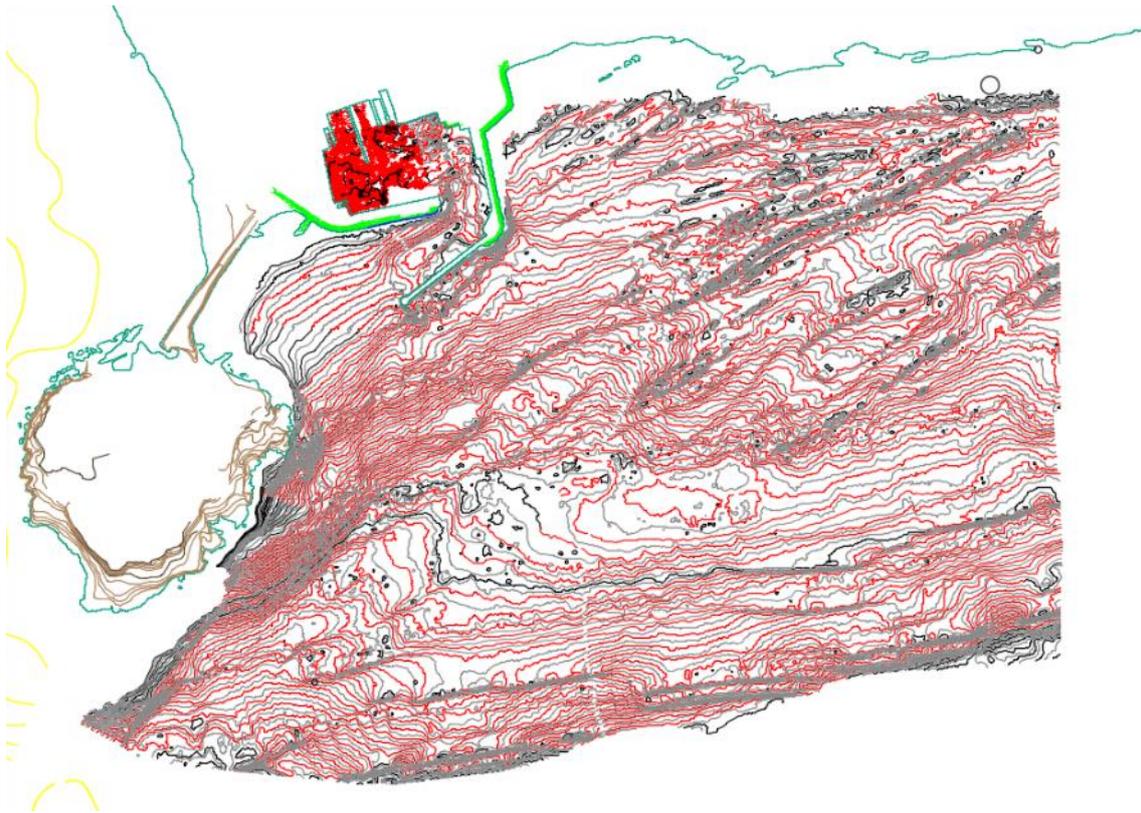


Figura 27: Batimetría de la zona

Como se puede observar en la figura 27, la batimetría tiene una forma bastante paralela a la costa, con una pendiente prácticamente constante. Se pueden distinguir varias acumulaciones de arena, en especial algunos bajos situados frente al dique de los tramos I y VII, con lo cual esto supondrá un lugar de concentración de oleaje cuando este se propaga hacia costa.

También es importante prestar atención a la península llamada isla de las Palomas. Este accidente geográfico condicionará sobre todo a los oleajes provenientes del oeste (W), dichos oleajes llegarán de forma muy transformada y no tendrán consecuencias en cuanto a eventos de rebase sobre cualquier tramo de los diques del puerto.

5.2) Descripción datos instrumentales

Los datos instrumentales proporcionados pertenecen a variables indicadoras de rebase.

Actualmente el proyecto SAFEPORT tiene instaladas varias cámaras de vídeo que permiten registrar los eventos de rebase sobre los diques. Precisamente, los datos instrumentales de que se dispone son heredados de dicho proyecto

Los datos muestran el número de olas que rebasan a los tramos del dique Sagrado Corazón en un estado de mar concreto. En este caso se tratan de los estados de mar del temporal del 20/02/2017. Es importante destacar que la única variable de rebase de la que se tienen datos es el número de eventos de rebase, es decir, número de olas del estado de mar que rebasan, por ello en el presente estudio se ha tomado la decisión de trabajar con dicho parámetro como variable principal de análisis.

De este temporal se cuenta con 8 horas para la validación de formulaciones. La altura de ola significativa, periodo pico, nivel del mar y dirección pico del oleaje se han obtenido a través de puertos de estado en el punto de predicción (sistema SAPO de Puertos del Estado) que coincide con el punto de información DOW con el que se realizará el estudio histórico

Se han elegido los tramos I y VII del dique Sagrado Corazón por las siguientes causas:

- El tramo I es el más vulnerable del dique, es decir, el más rebasable (ver en la tabla 9) observándose rebases de más de 100 olas, cosa que sólo se da en este tramo de dique.
- El tramo I es un dique de tipología en talud y el tramo VII es un dique vertical, con la idea que el estudio abarque ambas tipologías generales y diferentes, obteniendo formulaciones para cada una de estas tipologías.

A continuación, se muestra las tablas 7 y 8 con los datos instrumentales:

Estados de mar PDE (SIMAR 6054014)	Hs	Tp	Nivel (Cero Redmar)	Dir	Nivel
20/02/2017 10:00	4.26	10.02	0.95	89	0.842
21/02/2017 11:00	4.36	10.12	0.85	89	0.742
22/02/2017 12:00	4.42	10.24	0.75	89	0.642
23/02/2017 13:00	4.51	10.41	0.68	89	0.572
24/02/2017 14:00	4.58	10.64	0.63	89	0.522
25/02/2017 15:00	4.61	10.73	0.6	89	0.492
26/02/2017 16:00	4.56	10.76	0.6	89	0.492
27/02/2017 17:00	4.47	10.76	0.61	89	0.502

Tabla 7: Estados de mar que forman los datos instrumentales

SEA STATE	TRAMO	Nrebases
MTXimg_2017022010_M1	1	81
MTXimg_2017022010_M1	7	10
MTXimg_2017022011_M1	1	128
MTXimg_2017022011_M1	7	14
MTXimg_2017022012_M1	1	123
MTXimg_2017022012_M1	7	7
MTXimg_2017022013_M1	1	34
MTXimg_2017022013_M1	7	15
MTXimg_2017022014_M1	1	43
MTXimg_2017022014_M1	7	8
MTXimg_2017022015_M1	1	74
MTXimg_2017022015_M1	7	17
MTXimg_2017022016_M1	1	59
MTXimg_2017022016_M1	7	5
MTXimg_2017022017_M1	1	46
MTXimg_2017022017_M1	7	13

Tabla 8: Número de rebases en los tramos I y VII

Una vez expuestos los datos instrumentales, es necesario recalcar:

- La variable que se puede validar es el número de olas que rebasan en un estado de mar, con lo cual las formulaciones de esta variable quedarán validadas con los datos anteriormente presentados.
- Para realizar una validación de las formulaciones obtenidas para el caudal medio de rebase se comparan los resultados con la variable número de olas rebasadas. Aunque son variables diferentes, pueden estar relacionadas entre sí asumiendo la siguiente

hipótesis: los estados de mar con mayores olas rebasadas serán también los que registren más caudal.

Capítulo 6. Estudio histórico de rebase (hindcast)

6.1) Propagación y calibración de los datos

Para realizar el estudio histórico del rebase sobre los diques objeto de estudio es necesario obtener las variables del oleaje a pie de dique. Por ello, se propaga el oleaje desde el punto DOW (punto de información de oleaje), cuyas coordenadas y descripción se puede consultar en el apartado 3 de clima marítimo, hasta el punto a pie de dique de ambos diques objetivo de este estudio. Se seguirá la metodología del método híbrido de downscaling (véase capítulo 3) para la propagación del clima marítimo en un área determinada (*Camus et al. 2011*).

Para llevar a cabo la propagación se utiliza el modelo SWAN (*Booij et al. 1999*), este modelo es elegido por las siguientes razones:

- Es un modelo simple para la propagación de oleaje, posee la característica de resolver oleaje espectral.
- Resuelve de manera fluida la refracción y la dispersión del oleaje, con lo cual se adecua a este caso ya que estas transformaciones de oleaje son las que imperan. En este caso importa menos la rotura ya que es un estudio que no es importante la zona de rompientes.

La técnica de hibridación sigue los lineamientos de autoselección, propagación y reconstrucción de estados de mar propuesta por *Camus et al. (2011a)* y *Camus et al. (2011b)*, con lo cual se cumplen dos objetivos fundamentales:

- Conocer la estadística del clima marítimo en aguas profundas frente a la zona de estudio
- Minimizar el número de estados de mar a ser propagados numéricamente desde aguas profundas hasta la costa, debido a que actualmente es inviable o computacionalmente poco eficiente ejecutar la serie de oleaje de 60 años hora a hora. Dicho algoritmo corresponde a la técnica de máxima disimilitud (MaxDiss), la cual permite identificar aquellos estados de mar que representan el comportamiento medio y extremal del oleaje en cualquier punto, con una abstracción hacia un número reducido de éstos.

La utilización del algoritmo de selección Maxdiss con respecto de otros se basa en:

- El algoritmo de selección de máxima disimilitud selecciona casos de oleaje que se encuentran los “bordes” de la nube espacial de datos que corresponden a todo el registro de oleaje. Es decir, tiene la capacidad de seleccionar datos extremos.
- Siguiendo las recomendaciones de *Camus et al. 2011a* se selecciona este algoritmo ya que es el mejor para la propagar oleaje y aplicar el método híbrido.

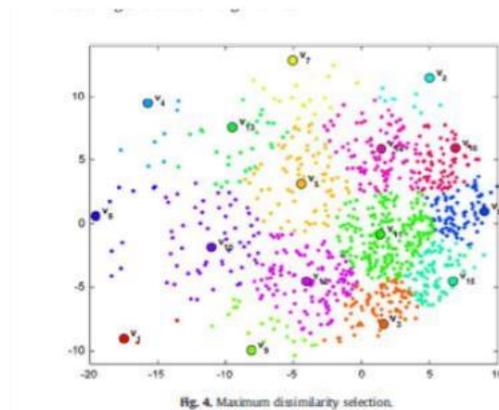


Figura 28: Representación de la selección de Máxima disimilitud.

Se realiza el estudio de propagación en dos hipótesis:

- 1) Selección y propagación de datos de oleaje y nivel sin incluir el viento
- 2) Selección y propagación de datos de oleaje y nivel incluyendo viento

Una vez realizado el análisis Maxdiss, se continúa a propagar dichos casos al pie de dique y a la posición de la boya de Tarifa. Esta tiene datos instrumentales de oleaje que sirven para validar el oleaje de reanálisis propagado y obtener el oleaje que mejor representa a la zona: el oleaje teniendo en cuenta el viento o no.

Una vez propagada la selección de oleaje a los puntos de control, se reconstruye la serie mediante una función RBF, de esta manera se obtienen los 60 años de datos históricos en cada uno de los puntos de control a pie de estructura.

La aplicación del algoritmo Maxdiss se realiza con las siguientes consideraciones:

- Zona micromareal – mesomareal, con lo cual se opta por seleccionar dos niveles de marea (pleamar y bajamar).
- Selección de 150 casos que representa de forma correcta el oleaje de la zona como se puede observar en la figura 29.

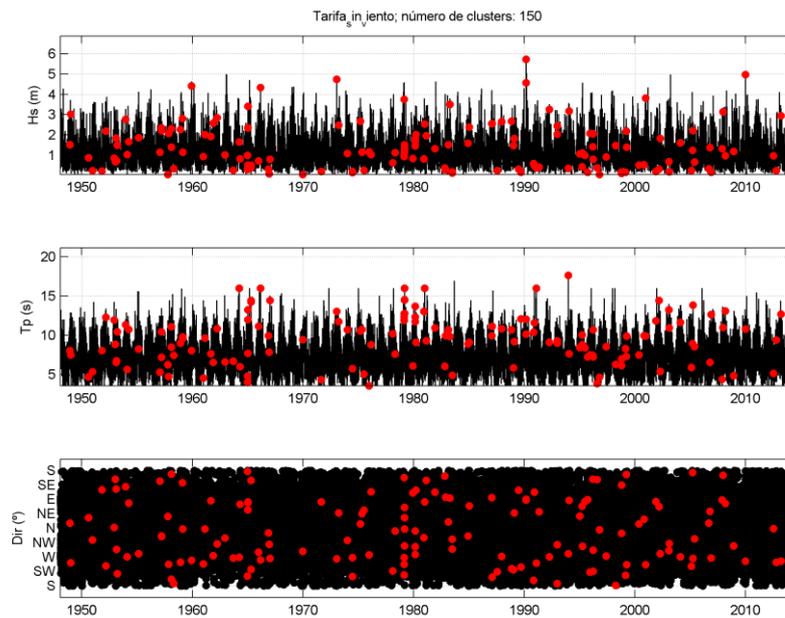


Figura 29: Análisis de selección aplicando el algoritmo Maxdiss

Por tanto, el montaje del modelo SWAN (figura 30) para esta propagación de ambos casos se realizan con las siguientes características:

- Batimetría: Presentada en el capítulo 4
- Malla general: Resolución $dx = dy = 100$ metros y el número de nodos en x es de 33 y en y de 36. La malla tiene unas dimensiones de 3300 x 3600 metros.
- Malla de detalle: Subdivisiones en x e y de 4, con lo cual la resolución es de $dx = dy = 25$ metros y unas dimensiones de 1300 x 1300 metros (para que encuadre también la coordenada que ocupa la boya).
- Puntos de salida de datos para el post proceso:

Punto	Coordenada x	Coordenada y
1 (Pie de dique tramo I)	265639.7722	3988108.918
2 (Pie de dique Tramo VII)	265496.3254	3987863.228
3 (Boya de Tarifa)	266544.68	3987051.17

Tabla 9: Puntos de control para propagación SWAN

- Forzamiento: Se propagan los dos forzamientos a analizar (oleaje con viento y sin viento)

Punto de forzamiento	Coordenada x	Coordenada y
P1 (Oleaje selección Maxdiss)	266772.28	3984856.2

Tabla 10: Punto de forzamiento

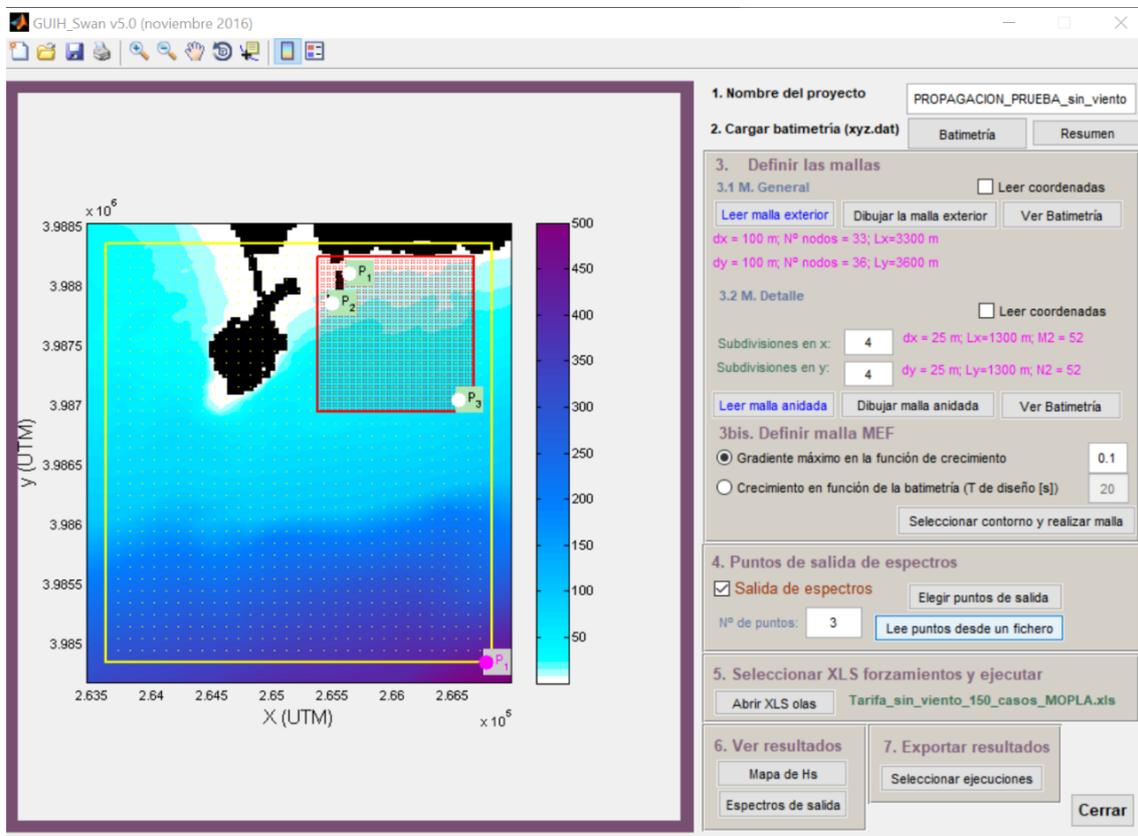


Figura 30: Montaje de modelo IH SWAN

Tras la propagación con el modelo se muestra a continuación en la figura 31 y 32 mapas de altura de ola a modo de ejemplo de la malla general y detalle respectivamente.

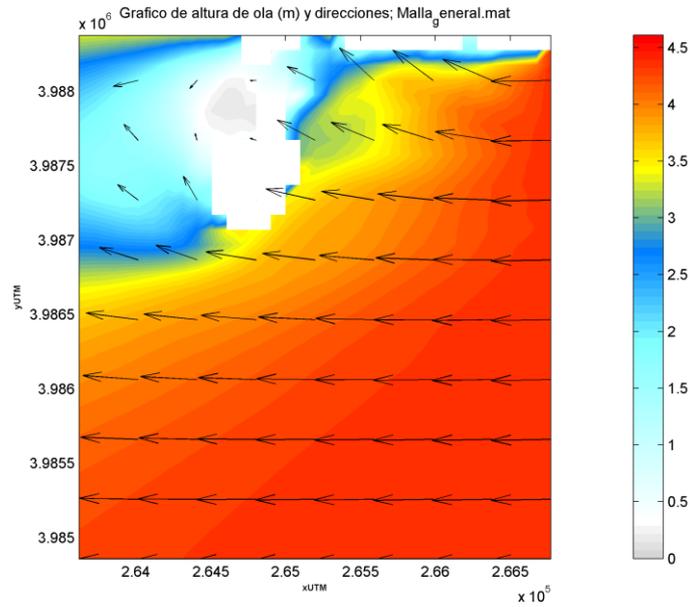


Figura 31: Mapa de propagación malla general

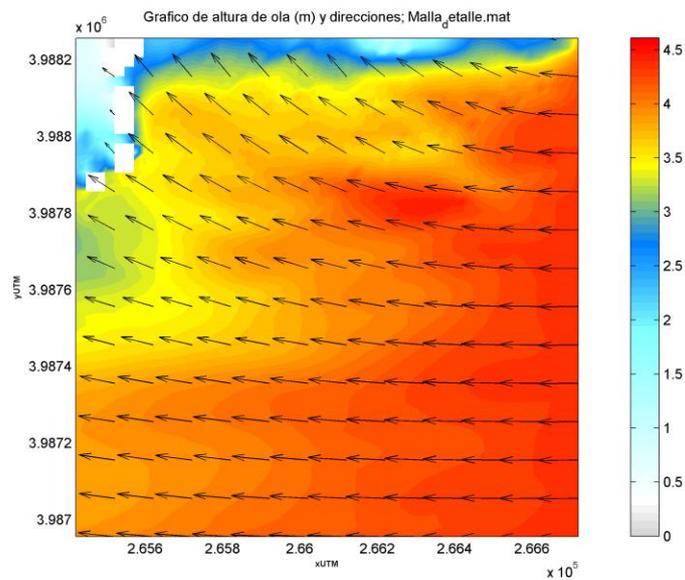


Figura 32: Mapa de propagación malla detalle

En ambas figuras 31 y 32, se puede observar un oleaje de levante (dirección de temporal predominante) como se propaga hacia el dique Sagrado Corazón. El oleaje gira hasta encarar el dique prácticamente perpendicular a este.

En las figuras 33 y 34 se muestra las series reconstruidas en el punto de control de la boya de Tarifa sin viento y con viento respectivamente, para posteriormente realizar la comparación y la calibración con los datos instrumentales.

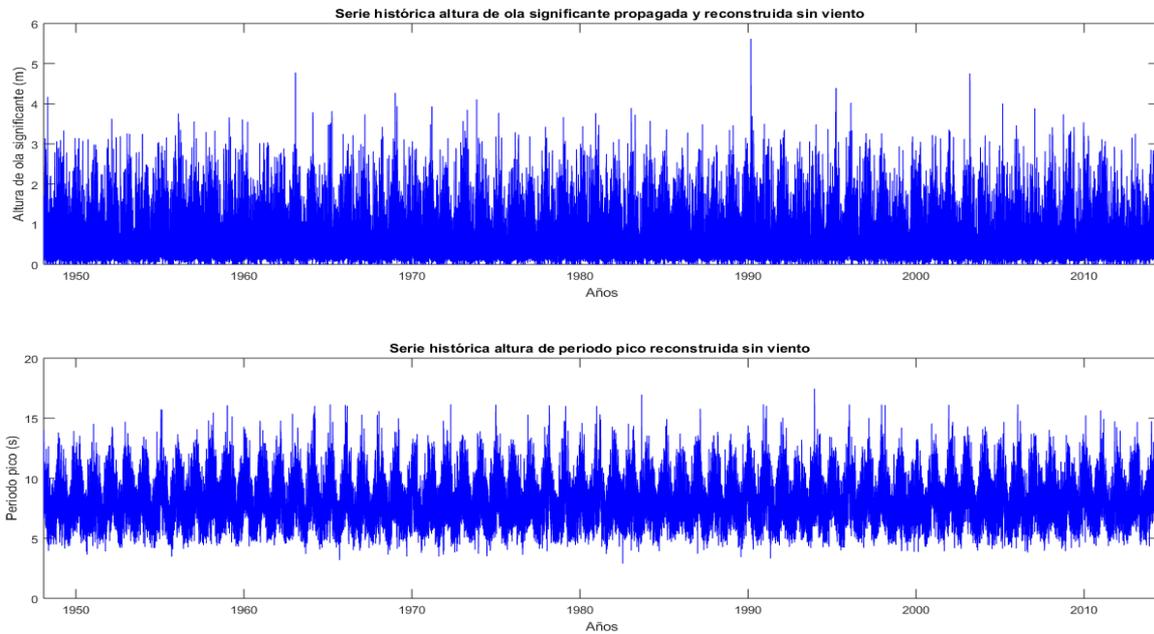


Figura 33: Series reconstruidas en el punto de control de la boya de Tarifa para propagación sin viento

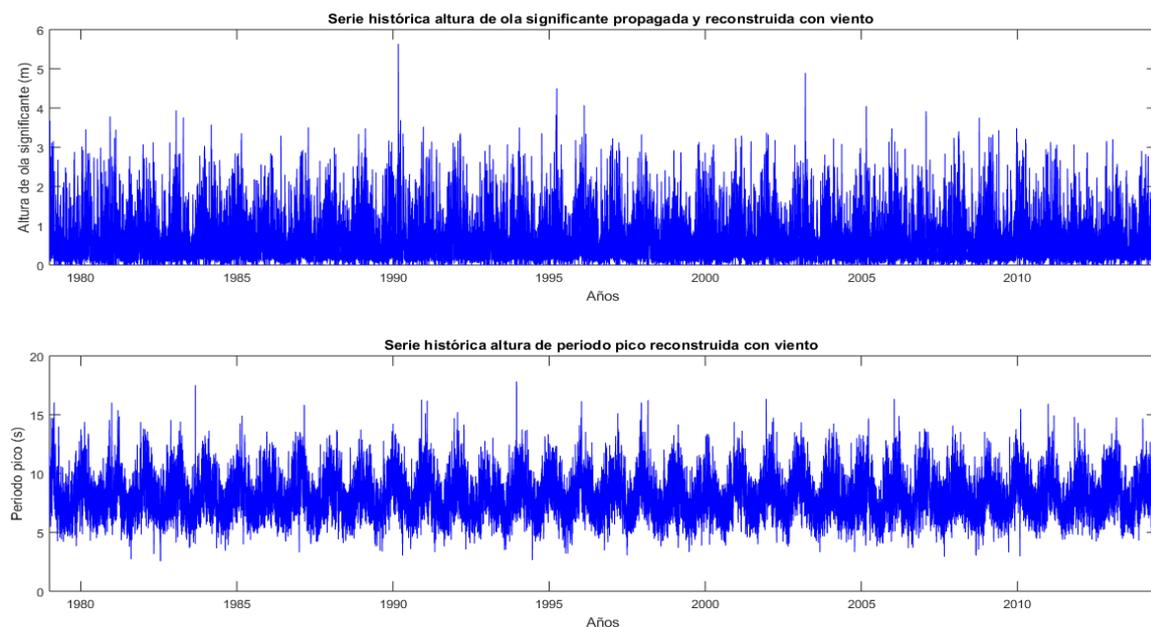


Figura 34: Series reconstruidas en el punto de control de la boya de Tarifa para propagación con viento

En la figura 35 se muestra dos gráficos comparativos de las series coincidentes de altura de ola significativa con y sin viento con los datos registrados de la misma variable por la boya de Tarifa.

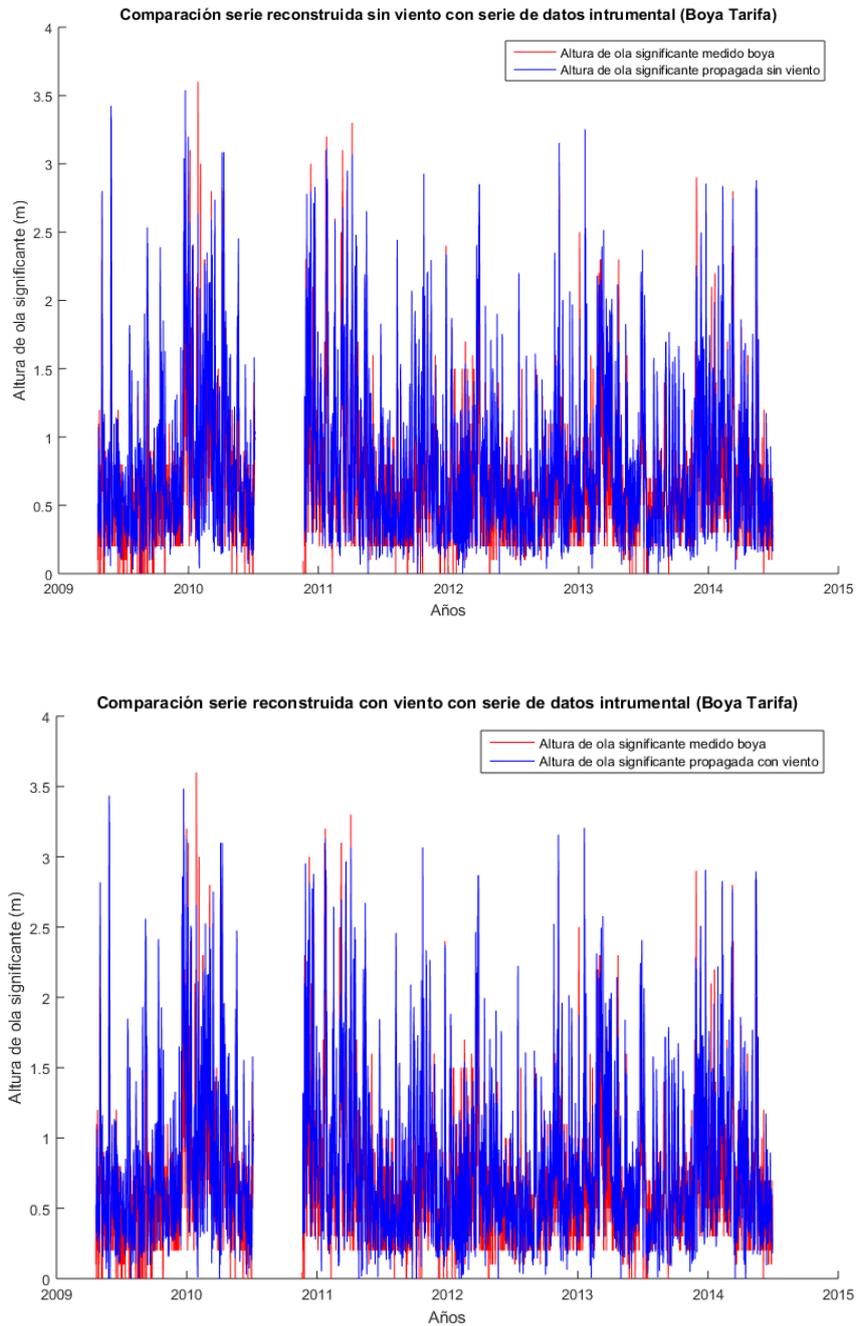


Figura 35: Comparación serie propaganda sin viento y con viento con datos recogidos por la boya de Tarifa

A continuación, se realiza una validación de ambas fuentes de datos propagadas y reconstruidas (con viento o sin viento) con los datos instrumentales de la boya. La variable que se analiza es la altura de ola.

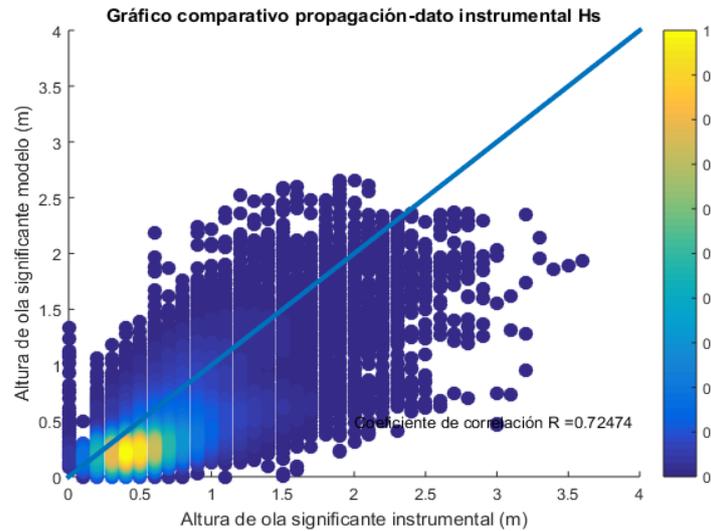


Figura 36: Comparación datos propagados sin viento con la boya

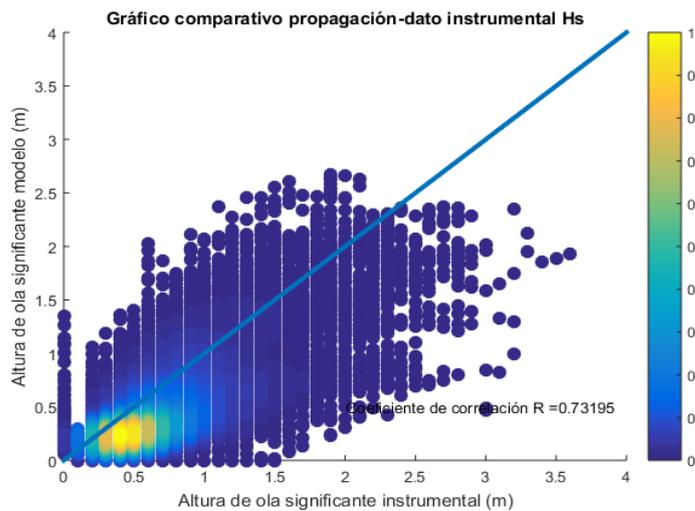


Figura 37: Comparación datos propagados con viento con la boya

Como se puede observar en la figura 36 y 37 existe una correlación de los datos bastante parecida:

- Coeficiente de correlación (R^2) para datos propagados sin viento: 0.72474
- Coeficiente de correlación (R^2) para datos propagados con viento: 0.73195

Ante estos resultados se procede a la calibración de los datos para mejorar el coeficiente de correlación entre los datos propagados con los instrumentales. Los coeficientes de correlación son muy parecidos, con lo cual, se toma la decisión de realizar el completo proyecto sin la variable de viento. Esto conllevará la simplicidad y rapidez del sistema de predicción al no tener que descargar estos datos del proveedor climático.

La calibración será una de tipología direccional, es decir, asignando un coeficiente a cada una de las direcciones. Tiene la siguiente expresión:

$$H_s^C = a(\theta) H_s^R b(\theta) \quad \text{Eq (5)}$$

Donde:

- H_s^C : Altura de ola calibrada
- $a(\theta)$ y $b(\theta)$: Coeficientes direccionales
- H_s^R : Altura de ola de reanálisis

La calibración y los coeficientes de calibración para el oleaje propagado sin viento se muestra en la figura 38 y 39.

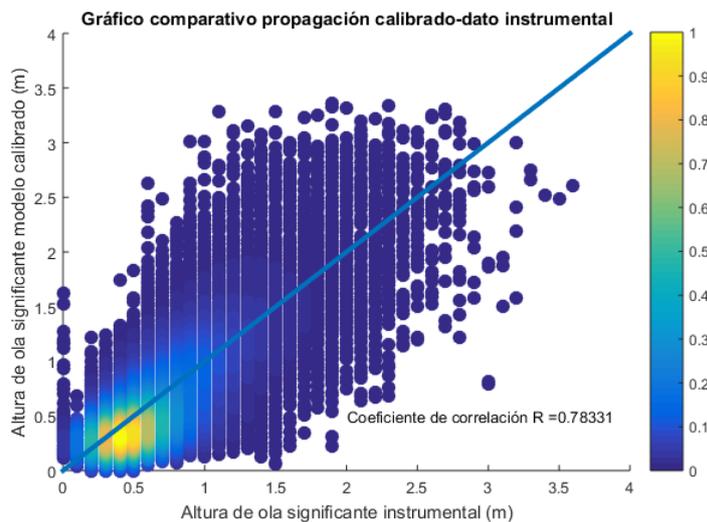


Figura 38: Variable H_s calibrada con oleaje instrumental de la boya

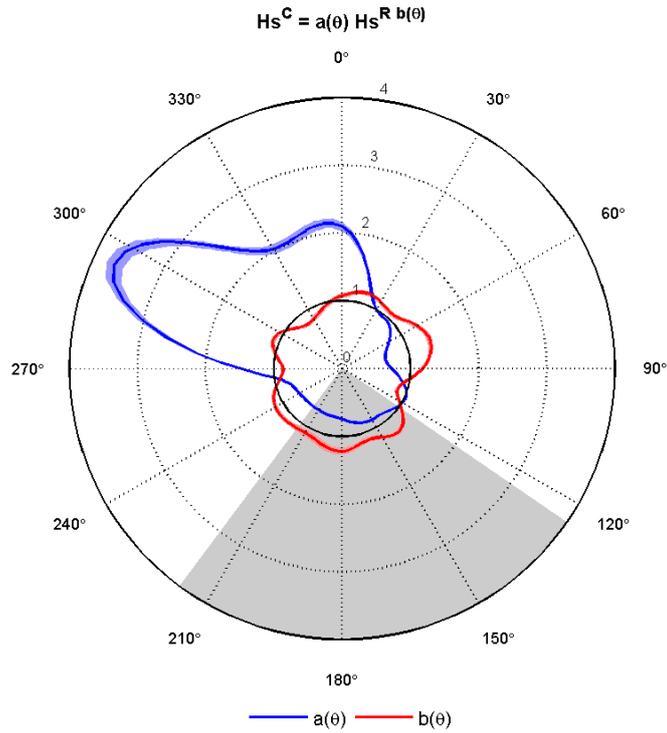


Figura 39: Coeficientes de calibración direccionales

θ	$a \pm CI^{95\%}$	$b \pm CI^{95\%}$
0.0°	2.10 ± 0.063	1.08 ± 0.040
22.5°	1.15 ± 0.017	1.17 ± 0.030
45.0°	0.95 ± 0.017	1.09 ± 0.032
67.5°	0.70 ± 0.021	1.34 ± 0.033
90.0°	0.72 ± 0.021	1.18 ± 0.027
112.5°	1.02 ± 0.017	0.87 ± 0.026
135.0°	0.90 ± 0.019	1.23 ± 0.033
157.5°	0.86 ± 0.019	1.12 ± 0.037
180.0°	0.75 ± 0.022	1.22 ± 0.049
202.5°	0.71 ± 0.023	1.11 ± 0.054
225.0°	0.70 ± 0.020	1.12 ± 0.034
247.5°	0.75 ± 0.020	1.09 ± 0.027
270.0°	1.50 ± 0.024	0.86 ± 0.023
292.5°	3.65 ± 0.122	1.09 ± 0.030
315.0°	2.53 ± 0.077	0.86 ± 0.026
337.5°	2.03 ± 0.073	0.89 ± 0.035
360.0°	2.10 ± 0.063	1.08 ± 0.040

Tabla 11: Coeficientes de calibración direccionales

En la figura 38 se puede observar la mejora con respecto a la altura de ola significativa sin calibrar, con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.78331. En la figura 38 se representa los coeficientes direccionales para calibrar la altura de ola, también se observa que los coeficientes más altos se concentran sobre las direcciones 270-360. Estas direcciones son de poco interés para el estudio ya que los oleajes de esa procedencia no tienen afección en cuanto a rebase se refiere al dique ya que la isla de las Palomas actúa como obstáculo ante estos. Finalmente, en la tabla 11 se muestra los coeficientes direccionales con las desviaciones típicas para aportar incertidumbre a la calibración de la altura de ola significativa.

Una vez obtenidos los coeficientes, estos calibran los oleajes de los puntos de control a pie de dique, con lo cual se procede a realizar el análisis histórico de oleaje para estos datos.

6.2) Umbral de rebase

Antes de realizar el estudio de rebase es necesario realizar un estudio de umbral de rebase, el cual nos permite identificar cuáles son los eventos que rebasan o no atendiendo a su caudal de rebase. La identificación de eventos que se consideran rebase es importante ya que permite determinar la operatividad de un puerto mediante las variables: número medio de paradas anuales/mensuales y duración de eventos de rebase. Para este estudio, la identificación de eventos de rebase es útil para realizar una comparación cuantitativa entre diferentes formulaciones para caudal medio de rebase (q).

Para este estudio se demanda el límite de rebase de cero rebase. Esta definición es ambigua ya que la formulación de rebase es exponencial por lo tanto el caudal de rebase nunca será cero. El manual Eurotop en su apartado 3.3.7 dedicado a "zero overtopping" se enuncia que puede considerarse un evento de rebase cuando el caudal es mayor a 0.1 l/s.

También se propone en el mismo manual el cálculo de dicho límite a través de la altura de ola. Los experimentos realizados en los apartados 5, 6 y 7 del mismo manual, el límite viene dado por el número adimensional: $q/(gH_{mo}^3)^{0.5} = 10^{-5}$. Con lo cual, por ejemplo:

- $H_{m0} = 1$ m; $q = 0.03$ l/s por m
- $H_{m0} = 3$ m; $q = 0.16$ l/s por m
- $H_{m0} = 5$ m; $q = 0.4$ l/s por m
- $H_{m0} = 7$ m; $q = 0.6$ l/s por m

A efectos de este estudio se adopta este último criterio.

6.3) Estudio de las secciones ante rebase

El estudio histórico de rebase indica las características principales de las secciones de los diques y cómo estos interactúan con el forzamiento. De esta forma ayuda al entendimiento de la zona y establecer conclusiones previas.

Como primera aproximación se utilizan las fórmulas del manual Eurotop con los coeficientes que se indicarán más adelante, para luego comparar dichas aproximaciones con las formulaciones que se obtienen a partir de los ensayos sobre las secciones de los diques.

Como se ha indicado en el capítulo 4, se estudian las secciones de los tramos I y VII. A continuación se estudian las características de las secciones, fórmulas y coeficientes utilizados. También se estudian los ángulos de los diques con respecto al norte para el correcto uso de las formulaciones.

Primero se muestra una gráfica que clarifica la dirección de las olas que dan principalmente rebase en las estructuras, ya que ambas estructuras poseen el mismo ángulo de orientación con respecto al norte (145 grados), esto se puede observar en la figura 40.



Figura 40: Estudio de orientación de los diques

6.3.1) Dique talud / Tramo I

En este apartado se presentan las diferentes formulaciones para las variables de rebase para el tramo I del dique Sagrado Corazón.

El posicionamiento del tramo I del dique Sagrado Corazón se muestra en la figura 41.



Figura 41: Posicionamiento de las cámaras de rebase del Proyecto SAFEPORT

A continuación, se presenta en la figura 42 las características principales del dique del tramo I y de las formulaciones utilizadas para el estudio histórico del Eurotop.

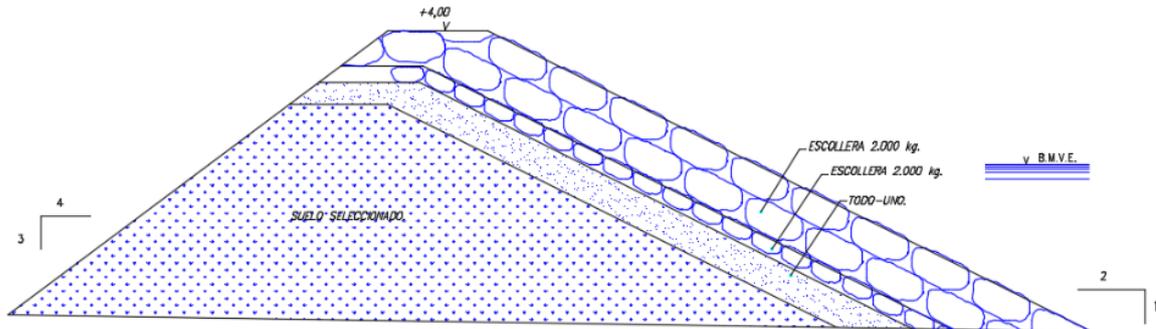


Figura 42: Sección dique tramo I

Las características de esta sección son las siguientes:

- Peso de la escollera del manto exterior (W1): 2000 kg. Con un diámetro nominal de la pieza de 0,90 metros. Porosidad de 0,35.
- Peso de la escollera manto interior (W2): 200 kg. Con un diámetro nominal de la pieza 0,42 metros. Porosidad de 0,30.
- Núcleo: Todo uno. Porosidad de 0,20.
- Pendiente del talud: 2/1.
- Cota de coronación: +4 sobre BMVE.
- Profundidad a pie de dique: 5 metros.
- Densidad de la escollera: 2650 Kg/m³.

Para de obtener un preanálisis, se presentan las fórmulas del Eurotop que se van a disponer para la primera aproximación y las consideraciones para tener en cuenta.

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{mo}^3}} = 0.09 \exp \left[\left(1.5 \frac{R_c}{H_{mo} \gamma_f \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right] \quad \text{Eq (6)}$$

- H_{mo} : Altura de ola significativa a pie de dique (m)
- R_c : Francorbordo (m)

- γ_f : Parámetro de fricción del material. Se considera un núcleo impermeable, con lo cual este valor es de 0,55 según la tabla 6.2 del Eurotop.
- γ_β : Parámetro de oblicuidad del material. Para estimar este parámetro se utiliza la siguiente expresión (6.9):

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0063 |\beta| \quad \text{Eq (7)}$$

Y para el número de olas rebasadas se utiliza la siguiente expresión (6.4):

$$\frac{N_{ow}}{N_w} = \exp \left[- \left(\frac{R_c D_n}{0.19 H_{mo}^2} \right)^{1.4} \right] \quad \text{Eq (8)}$$

- R_c : Francobordo (m).
- D_n : Diámetro nominal de la pieza (m).
- H_{mo} : Altura de ola significativa a pie de dique (m)

En la figura 43 se puede observar la serie histórica de rebase calculado mediante la ecuación 6.

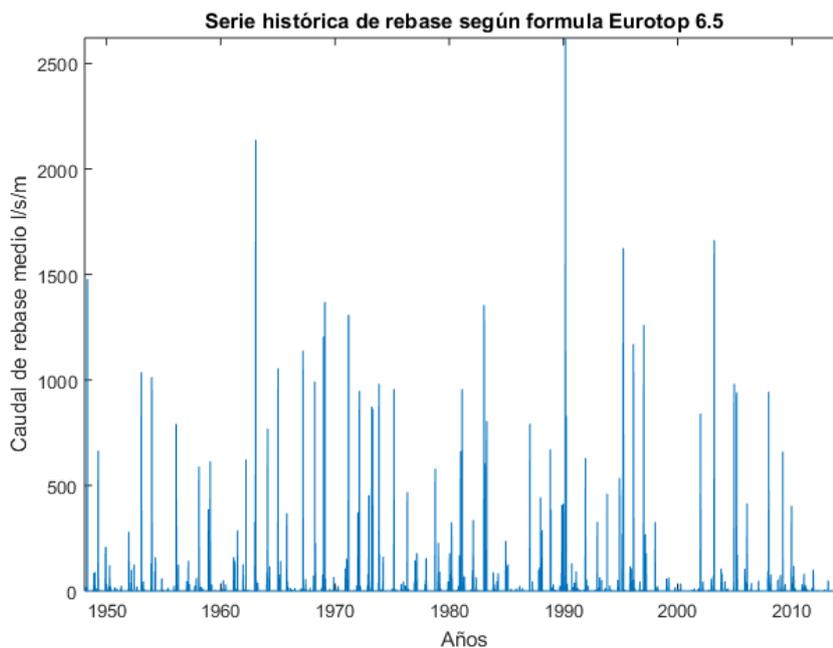


Figura 43: Serie histórica de rebase para el tramo I según formulación del Eurotop

Se presenta la gráfica de caudales medios de rebase mensuales en la figura 44. Los rebases se concentran en los meses de invierno cuando la altura de ola es significativamente mayor que en otras épocas del año.

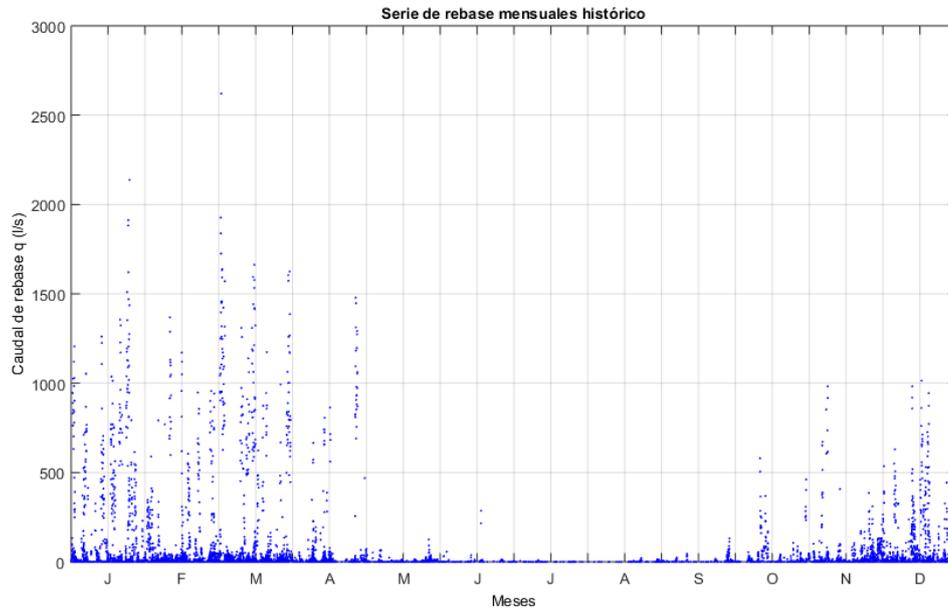


Figura 44: Evolución temporal anual del caudal medio de rebase para tramo I

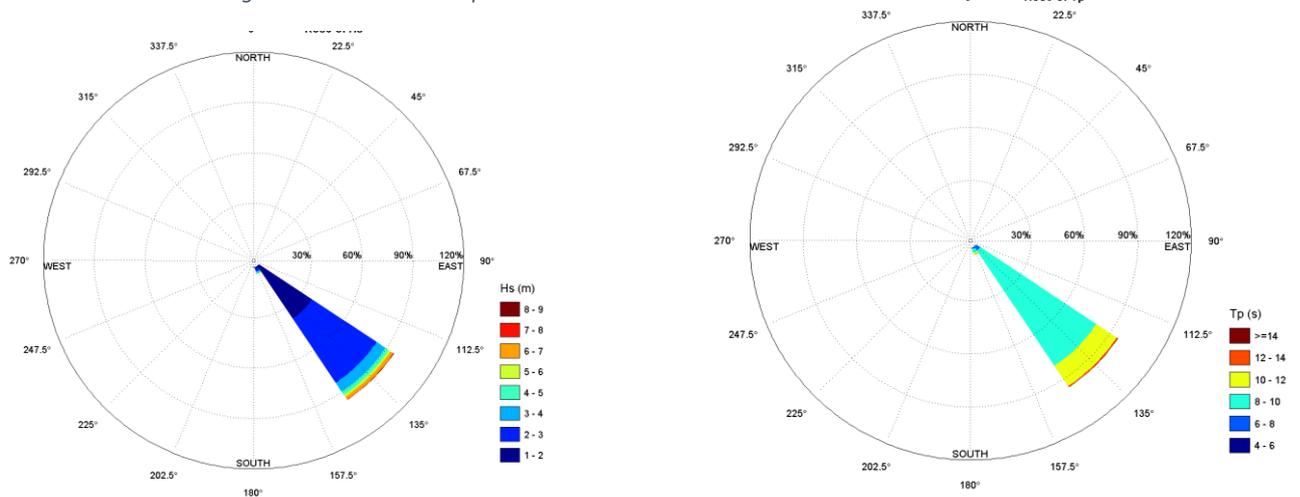


Figura 45: Rosas de rebase para dique tramo I

Como se puede observar en la figura 45, las rosas de rebase muestra tanto la magnitud de las alturas de ola significativa y periodos pico que rebasan tanto como la dirección con la que lo hacen a pie de dique. La mínima altura de ola a partir de que las olas rebasan es de 1.5 metros.

Los periodos más comunes de rebase son de 8-12 segundos. En cuanto a la dirección está muy concentrada, desde 120-180 grados (figura 46).

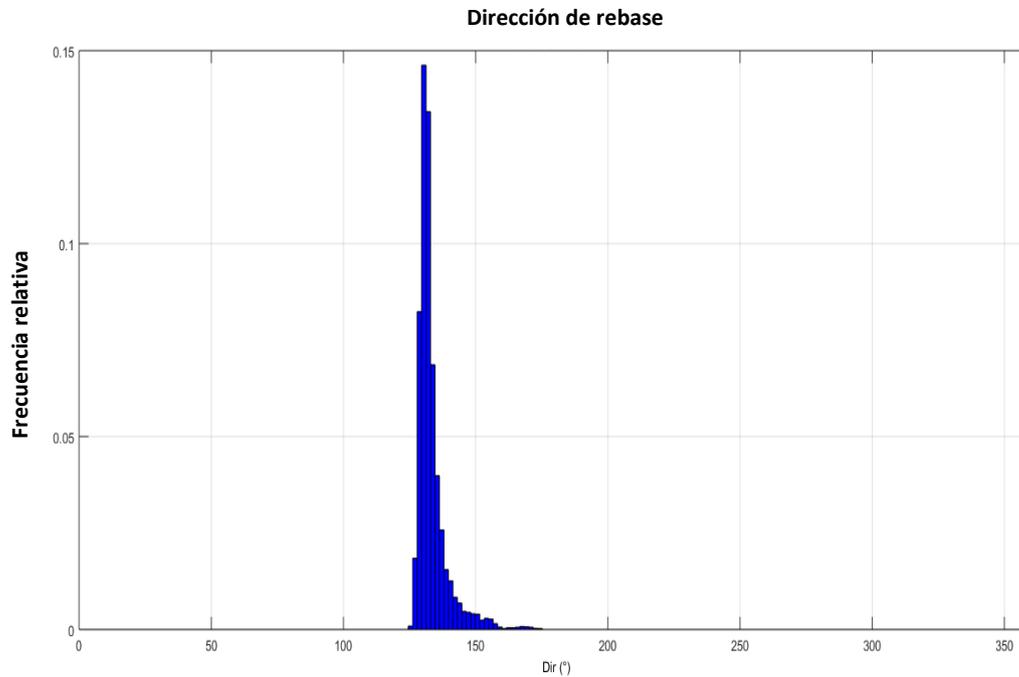


Figura 46: Dirección de rebase sobre dique tramo I

La relación que existe entre la dirección de rebase a pie de dique y la dirección en aguas profundas se puede observar en la figura 47. Esto permite identificar en forma de alerta temprana los oleajes que van a rebasar desde aguas profundas en base a su dirección.

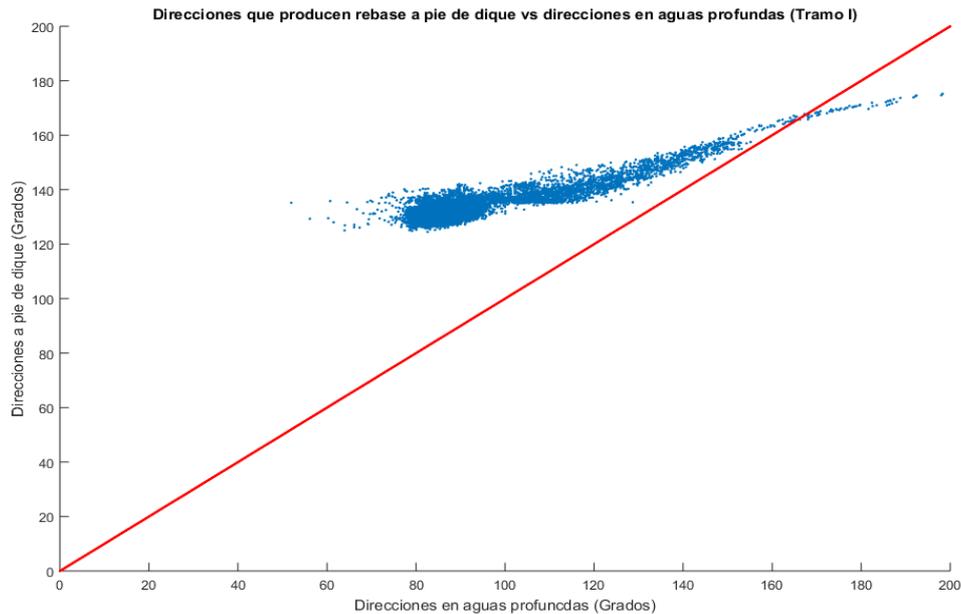


Figura 47: Comparación de dirección a pie de dique y aguas profundas de rebase para el tramo I

Como se puede observar en la figura 47, las olas que rebasan se concentran a pie de dique entre las direcciones 120-160 grados con independencia de la procedencia del oleaje en aguas profundas debido a que la batimetría frente al dique es paralela a la orientación de este, haciendo que los frentes de onda giren y se concentren en las direcciones indicadas. Del estudio del clima marítimo (véase capítulo 3), por ejemplo, se deduce que los temporales llegan desde el este (E) con direcciones en aguas profundas de entre 80-100 grados y al propagarse hacia pie de estructura quedan dentro del rango anteriormente descrito (120-160 grados), con lo cual coincide con el gráfico y estas olas pueden dar lugar a rebase.

Tras este estudio direccional, se puede concluir que las olas que dan lugar al evento de rebase no provienen de las siguientes direcciones en aguas profundas:

- $0 < \text{ángulo de incidencia en aguas profundas} < 70 \text{ grados}$
- $200 > \text{ángulo de incidencia en aguas profundas} > 360 \text{ grados}$

6.3.2) Dique vertical/ Tramo VII

El tramo VII del dique Sagrado Corazón es de tipología vertical (figura 48). Se puede apreciar en los datos instrumentales que es el tramo que menos rebase sufre debido a su cota de coronación, +7.6 metros sobre BMVE que comparado con los +6.6 metros del tramo VI o los +4 metros del tramo I, constituye el tramo más alto del dique Sagrado Corazón.



Figura 48: Posicionamiento de las cámaras de rebase del Proyecto SAFEPORT respecto al tramo VII

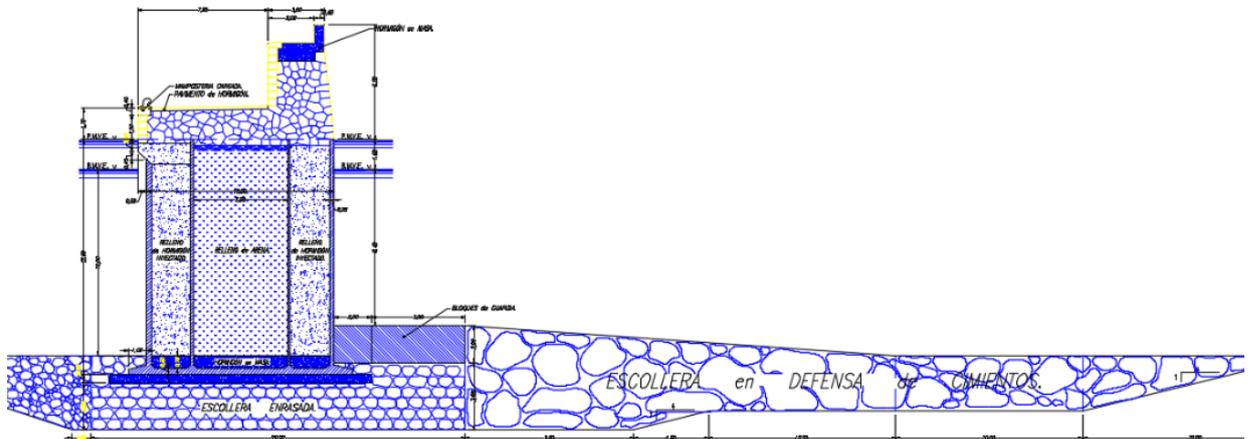


Figura 49: Sección dique tramo VII

Las características de esta sección mostrada en la figura 49 son las siguientes:

- Cota de coronación: +7.8 sobre BMVE.
- Profundidad a pie de dique: 6.4 metros (respecto a BMVE).
- Densidad del hormigón: 2300 kg/m³.
- Dispone de una zona de escollera para la protección de la cimentación, esta parte se modelará en el IH2VOF mediante un cuerpo poroso de 0,3 de porosidad.

Para obtener un preanálisis del rebase, se presentan las fórmulas del Eurotop que se van a disponer para la primera aproximación y las consideraciones establecidas.

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{mo}^3}} = 0.047 \exp \left[- \left(2.35 \frac{R_c}{H_{mo} \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right] \quad \text{Eq (9)}$$

- H_{mo} : Altura de ola significativa a pie de dique (m)
- R_c : Francobordo (m)
- γ_β : Parámetro de oblicuidad del material. Para estimar este parámetro se utiliza la siguiente expresión (7.17):

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0062 |\beta| \quad \text{Eq (10)}$$

Y para el número de olas rebasadas se utiliza la siguiente expresión (6.4):

$$\frac{N_{ow}}{N_w} = \exp \left[-1.21 \left(\frac{R_c}{H_{mo}} \right)^2 \right] \quad \text{Eq (11)}$$

- R_c : Francobordo (m).
- D_n : Diámetro nominal de la pieza (m).
- H_{mo} : Altura de ola significativa a pie de dique (m)

La serie histórica de rebase es la que se muestra en la figura 50:

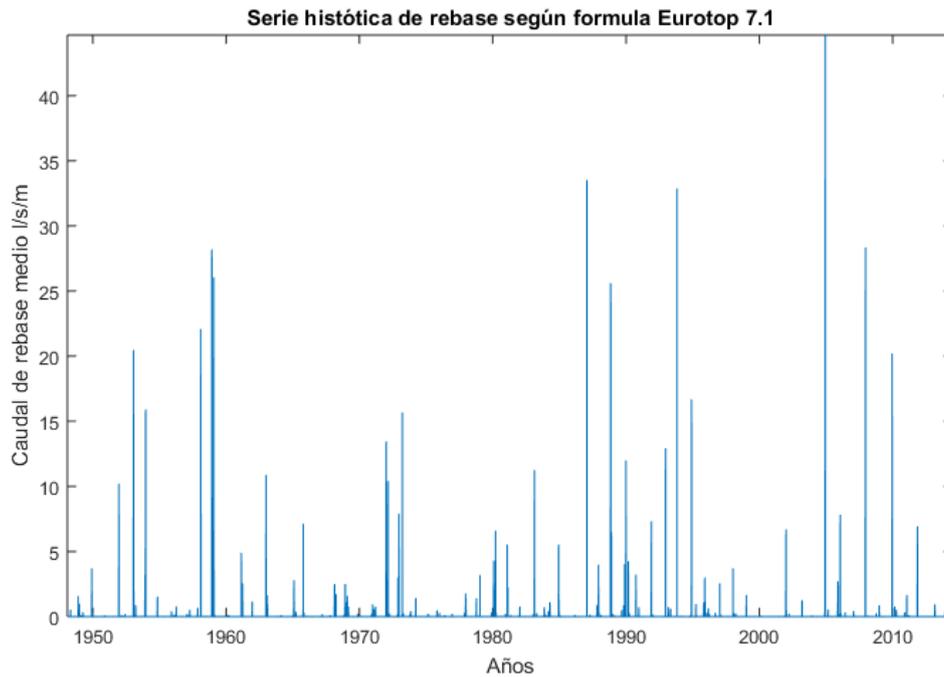


Figura 50: Serie histórica rebase para el tramo VII según formulación del Eurotop

La diferencia con el tramo I en cuanto a caudal medio de rebase es notoria y evidente por la diferencia en la cota de coronación.

Las rosas de rebase se pueden observar en la figura 51.

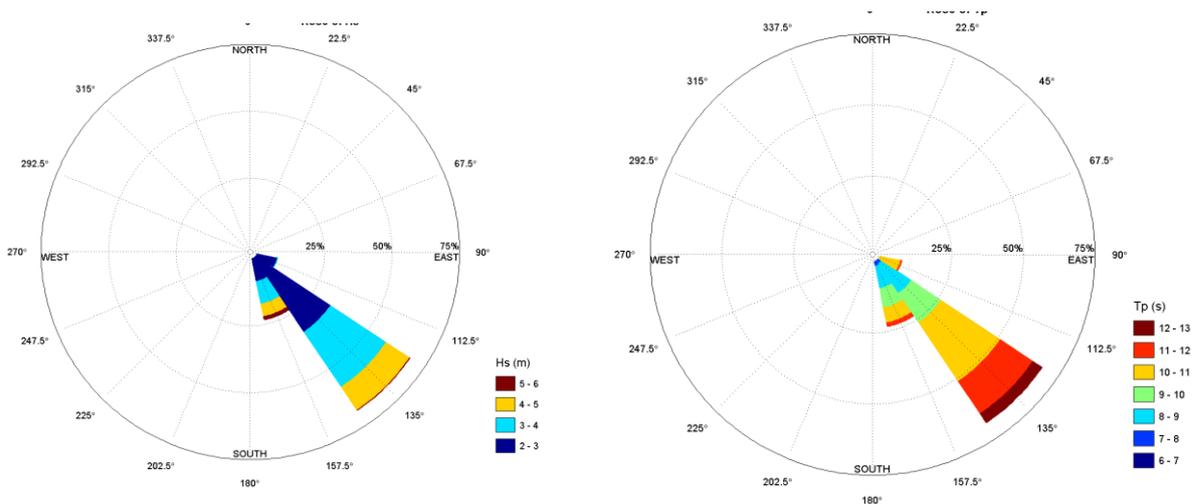


Figura 51: Rosas de rebase para dique tramo VII

Como se puede observar en la figura 51, la dirección principal de rebase coincide con la del tramo I ya que ambos diques poseen la misma orientación. En este caso la altura de ola mínima a partir de la cual es posible que rebase es de 2.5 metros. En cuanto a los periodos, se repite el mismo comportamiento, el periodo más probable de rebase son los correspondidos entre 8-12 segundos.

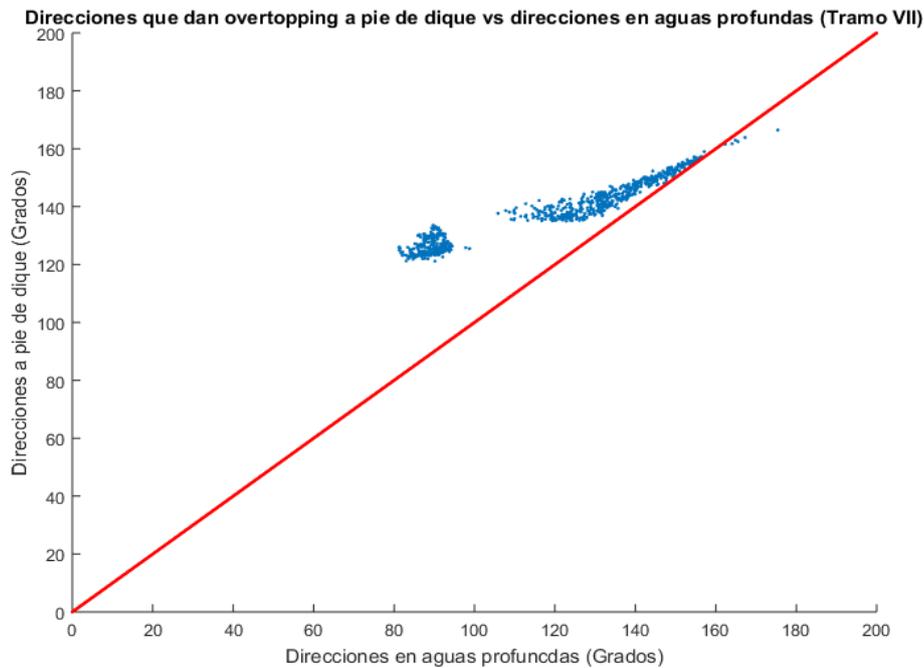


Figura 52: Comparación de dirección a pie de dique y aguas profundas de rebase para el tramo VII

Como se puede observar en la figura 52, al igual que para el tramo I, las olas que rebasan se concentran a pie de dique entre las direcciones 120-160 grados con independencia de la procedencia del oleaje en aguas profundas debido a que la batimetría frente al dique es paralela a la orientación de este, haciendo que los frentes de onda giren y se concentren en las direcciones indicadas.

6.4) Validación de las formulaciones del Eurotop

En este subapartado se expone la comparación de los datos de rebase obtenidos mediante la formulación del manual Eurotop con los datos instrumentales de rebase expuestos en el capítulo 4. Es importante recalcar la falta de datos instrumentales para realizar la validación de ambos tramos.

La figura 53 muestra un gráfico comparativo de los datos expuestos para el tramo I del dique Sagrado Corazón:

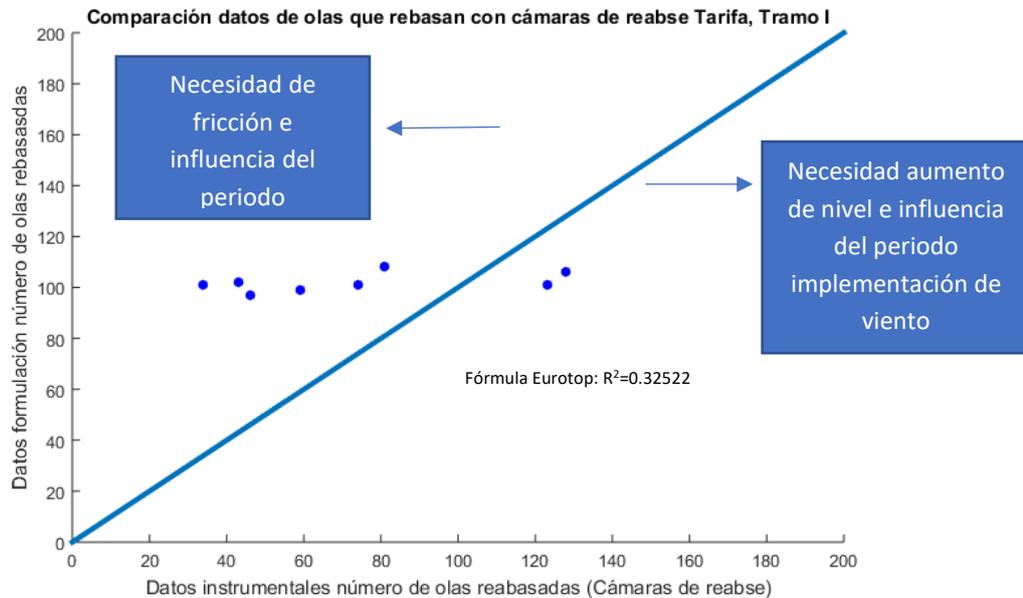


Figura 53: Comparación datos de olas que rebasan empleando Eurotop con daos instrumentales para el tramo I

Como se puede observar en la figura 53, el coeficiente de correlación resultante de la comparación de los datos obtenidos mediante la formulación de rebase del Eurotop con los datos instrumentales es de $R^2=0.3222$ que supone una correlación baja. Los datos que se localizan a la izquierda de la bisectriz del cuadrante suponen que la formulación de olas rebasadas por el Eurotop son mayores que las instrumentales, con lo cual en estos puntos la fórmula sobreestima el número de olas de rebase, y los que se localizan a la derecha son menores subestimando olas de rebase aunque en este caso en menor medida que en los puntos de la izquierda, la diferencia en esta región es de 20 olas mientras que en el lado izquierda se sobreestiman hasta 70 olas. Esta distribución de la nube de puntos hace realizar dos hipótesis para explicar el comportamiento y de la posible mejora de la formulación:

- Aplicando un factor de fricción que varíe con la altura de ola y con el periodo es posible que los puntos localizados a la izquierda de la bisectriz bajen y se posicionen más cerca de esta, logrando una mejor correlación con los datos.

- b) Aplicando un aumento del nivel del mar, variable fundamental en la formulación de número de olas rebasadas, para que en esos puntos aumente el rebase y se posicionen más cercanos a la convergencia con los datos instrumentales ya que estos rebases se producen cuando el nivel del mar es mayor que la media marea que se sitúa en los 0,6 metros, es decir, los estados de mar 1 y 3 de los datos instrumentales (véase tabla 8). La introducción de la acción del viento puede llegar a modificar la formulación aumentando el rebase sobre la estructura. Es importante recalcar que en este estudio se prescindirá de la acción del viento.

Para el tramo VII, la gráfica comparativa de los datos obtenidos de rebase por la formulación del Eurotop con los instrumentales se puede observar en la figura 54.

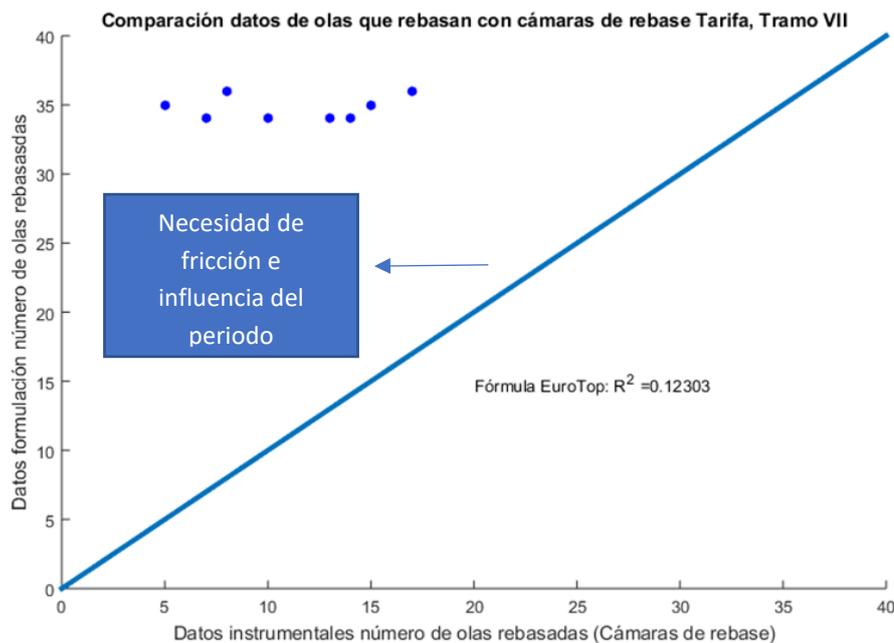


Figura 54: Comparación datos de olas que rebasan empleando Eurotop con daos instrumentales para el tramo VII

En este tramo la comparación de los datos arroja un coeficiente de correlación de $R^2=0.12303$, lo que supone una correlación muy baja. Como se observa en la figura 54, la fórmula del Eurotop sobreestima el número de olas rebasadas en comparación a los datos instrumentales, llegando a estimar en el peor de los casos (estado de mar 7) 30 olas, con lo que para la mejora de la formulación de este tramo se propone la modificación de la fórmula del Eurotop empleada para esta tipología de dique, incluyendo coeficientes de fricción diferentes con el objetivo de

implementar en la formulación este aspecto de disipación, y lograr que los puntos situados a la izquierda de la bisectriz converjan con los datos instrumentales. En la formulación para este tramo de tipología vertical no se tiene en cuenta la influencia del periodo, con lo cual puede ser una de las razones a incluir para dotar a la fórmula de mayor fiabilidad.

Capítulo 7. Formulación de rebase modificada

En este capítulo del estudio se estudian ambas secciones (tramo I y VII) para realizar una modificación de la formulación de rebase que trate de mejorar los resultados obtenidos en el análisis histórico con las formulaciones clásicas del manual Eurotop.

El estudio de la modificación de la formulación consiste en la utilización de los modelos necesarios para así obtener resultados particularizados para cada sección de dique y a partir de ellos obtener la modificación mediante relaciones adimensionales.

Se opta por el modelo IH2VOF (*Losada et al. 2008* y *Lara et al. 2011*) para obtener los parámetros de fricción que afectan al oleaje ante el evento de rebase. Este modelo resuelve las ecuaciones en 2D de Reynolds promediadas por Navier-Stokes (RANS) basadas en las siguientes hipótesis:

- Asume que el fluido es incompresible para derivar las ecuaciones RANS
- En el modelo IH2VOF, el tensor de tensión es relacionado con la tensión del flujo medio a través del modelo algebraico no lineal $k-\varepsilon$ (*Shih et al. 1996*).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad \text{Eq (12)}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j},$$

- La principal hipótesis del IH2VOF es la de considerar que las ecuaciones de RANS conjunto con un apropiado modelo de turbulencia (modelos $k-\varepsilon$), pueden describir adecuadamente la trayectoria del flujo en un medio poroso. El volumen es descrito por la siguiente formulación:

$$\langle a \rangle = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} a \, dV, \quad \text{Eq (13)}$$

Donde $\langle \rangle$ denota la media intrínseca de volumen, V es la media de volumen total y V_f es el volumen en V en el cual es ocupado por el fluido en una fase y $\langle a \rangle$ es la magnitud promediada. El operador intrínseco está definido por el operador de volumen medio de Darcy:

$$\langle K \rangle_D = \frac{1}{V} \int_{V_f} a \, dV \quad \text{Eq (14)}$$

A través de la relación: $\langle a \rangle_D = n \langle a \rangle$, donde $n = V_f/V$, es la porosidad. El parámetro $\langle a \rangle$ muestra la velocidad de infiltración. Aplicando el volumen intrínseco a las ecuaciones RANS, la velocidad media de las ecuaciones RANS son asumidas como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \frac{\langle \bar{u}_j \rangle}{1 + c_A} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} &= \frac{1}{\rho(1 + c_A)} \left[-\frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho \langle u'_i u'_j \rangle}{\partial x_j} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \langle \bar{\tau}_{ij} \rangle}{\partial x_j} + \rho g_i \right] - \frac{1}{1 + c_A} \left[\frac{\alpha v (1 - n)^2}{n^2 D_{50}^2} \langle \bar{u}_i \rangle \right. \\ &\quad \left. + \frac{\beta (1 - n)}{n D_{50}^2} \sqrt{\langle \bar{u}_1 \rangle^2 + \langle \bar{u}_2 \rangle^2} \langle \bar{u}_i \rangle \right]. \end{aligned} \quad \text{Eq (15)}$$

- La ecuación usada en el modelo para las fuerzas de arrastre lineales y no lineales es:

$$I = \frac{\alpha v (1 - n)^2}{n^2 D_{50}^2} \bar{u} + \frac{\beta (1 - n)}{n^2 D_{50}^2} \bar{u} |\bar{u}| \quad \text{Eq (16)}$$

Asumiendo la porosidad (n) constante. Los parámetros empíricos usados en la calibración del modelo son α y β

Este modelo es incluido en el estudio por las siguientes razones:

- Simula el rebase sobre la estructura, registrando variables que son objeto de estudio como el caudal de rebase (q) o el número de olas que rebasan la estructura por estado de mar.
- Posibilidad de colocar puntos de control frente al dique para tener registro de la masa de agua acumulada en el pie de este.
- Bajo demanda computacional para la simulación de oleajes irregulares.
- Posibilidad de insertar la sección de la estructura con sus características de campo.

Limitaciones:

- Modelo en 2D: no se puede simular en tres dimensiones con lo cual no se tiene en cuenta la tridimensionalidad del entorno del dique.
- Carece de la introducción de viento.

Como se introdujo en el subapartado 5.4 del capítulo 6, el incremento del nivel del mar puede ser un efecto que se produzca a pie de dique fruto de la acumulación del agua debido a la geometría del puerto, para ello, se opta por el modelo IH2BOUSS (*Nwogu 1993; Woo & Liu 2004a; Woo & Liu 2004b; Losada et al. 2008 y Kim et al. 2009*).

El modelo se basa en la resolución de las ecuaciones de Boussinesq. La velocidad vertical no es calculada por ecuaciones de balance no lineales. En vez de esto, la componente horizontal de la velocidad es asumida constante en la columna de agua y en la componente vertical varía casi linealmente con la profundidad. Las ecuaciones de Boussinesq son derivadas en horizontal sustituyendo la función del potencial por condiciones dinámicas y cinemáticas de contorno de superficie.

La siguiente formulación de Boussinesq se refiere a un fondo no horizontal:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(d + \eta)\bar{u}_x] = 0 \quad \text{Eq (17)}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_x}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_x}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{2} d \frac{\partial^3 (d\bar{u}_x)}{\partial t \partial x^2} - \frac{1}{6} d^2 \frac{\partial^3 \bar{u}_x}{\partial t \partial x^2}$$

Donde \bar{u}_x es la velocidad horizontal promediada en vertical. En esencia estas ecuaciones son de shallow-water con correcciones para la aceleración vertical. Las otras terceras derivadas son resultado de la ecuación de Laplace forzando a la velocidad vertical de la función potencial ser expresadas en términos de distribución de velocidad horizontal.

Resuelve los patrones temporales de propagación de oleaje, transformación y agitación, dentro de dominios numéricos con contornos complejos, sobre batimetrías reales, a través de la

utilización de mallas regulares en volúmenes finitos y resolviendo los patrones bidimensionales (2DH) de velocidades, presiones, y superficie libre, considerando los procesos de asomeramiento, refracción, difracción, y run-up en playa y estructuras portuarias, así como la reflexión y radiación del oleaje.

Además, el modelo numérico incluye en su formulación los procesos de disipación de energía por absorción parcial o total de los contornos, procesos asociados a la rotura del oleaje, fricción por fondo y efectos turbulentos.

Una de las ventajas fundamentales de utilización del modelo numérico IH2BOUSS, es que este se basa en capacidades avanzadas para resolver los patrones de oleaje sobre un dominio numérico con contornos complejos reales considerando una evolución temporal de dichos patrones, resolviendo las velocidades, presiones y superficie libre en el plano bidimensional.

El posible set-up adicional debido a que se puede acumular una masa de agua frente al dique por la reflexión del oleaje que se produce en el tramo II del dique Sagrado Corazón, tal y como se muestra en la figura 55. Con lo cual, el francobordo sería menor, favoreciendo un mayor de olas rebasadas.

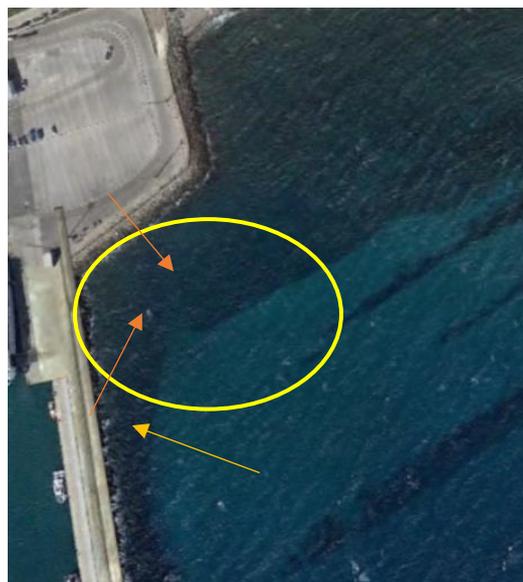


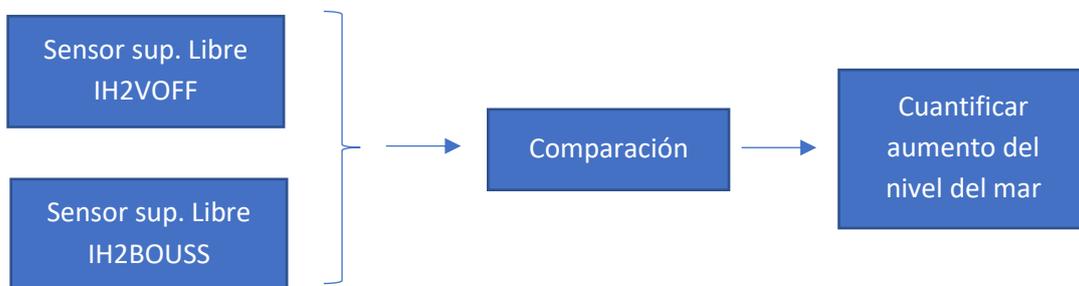
Figura 55: Acumulación de agua frente a dique tramo I

Para poder evaluar este efecto de acumulación de agua frente al tramo I, es necesaria la utilización modelo que permita resolver este problema de tridimensionalidad. Para ello se utiliza el IH2BOUSS.

Limitación IH2BOUSS:

- Imposibilidad de simular la sección real del dique. Se simula como un obstáculo con una pendiente que es el talud del manto del dique en el caso del tramo I.

De esta manera se puede cuantificar cual es el aumento del nivel debido a la presencia del tramo II.



En los siguientes subapartados, se presentan las características de los ensayos llevados a cabo y las formulaciones modificadas obtenidas para cada tramo de dique.

7.1) Dique Sagrado Corazón tramo I

La sección objeto de ensayo para este tramo dibujada y caracterizada en IH2VOF se muestra en la figura 56:

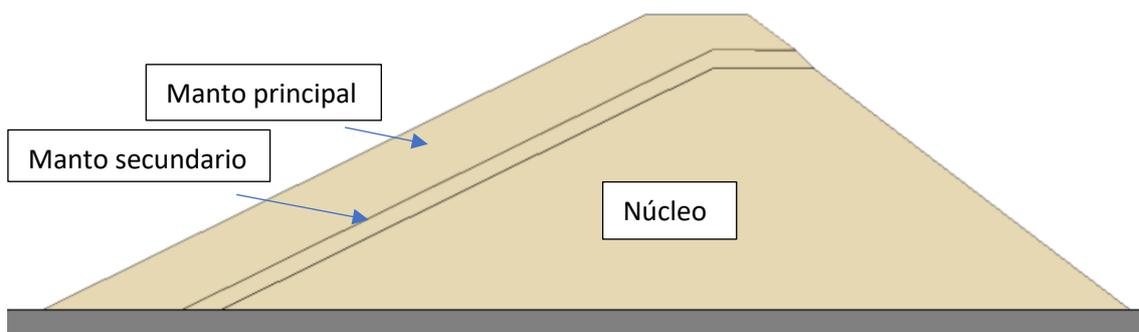


Figura 56: Sección IH2VOF para el dique tramo I

Las características de esta sección se presentan en la tabla 12:

Característica	Manto principal	Manto secundario	Núcleo
Porosidad (%)	35	30	20
Coefficiente fricción lineal	200	200	200
Coefficiente de fricción no lineal	1.10	1.10	1.10
Coefficiente de masa	0.34	0.34	0.34
Dn50(m)	0.91	0.42	0.20

Tabla 12: Características ensayo IH2VOF para dique tramo I

Las características de la tabla 12 se mantienen constantes en todos los ensayos para este tramo.

En la tabla 13 se muestra las características del tanque de ensayo:

Dimensión	Cantidad (m)
Largo	200
Altura	20
Altura del agua pie de dique (BMVE)	9

Tabla 13: Características del tanque de ensayo para tramo I

Para el mallado del modelo, se opta por una malla variable tanto a lo largo del eje x como de y. Estas características de mallado se pueden observar en la figura 57.

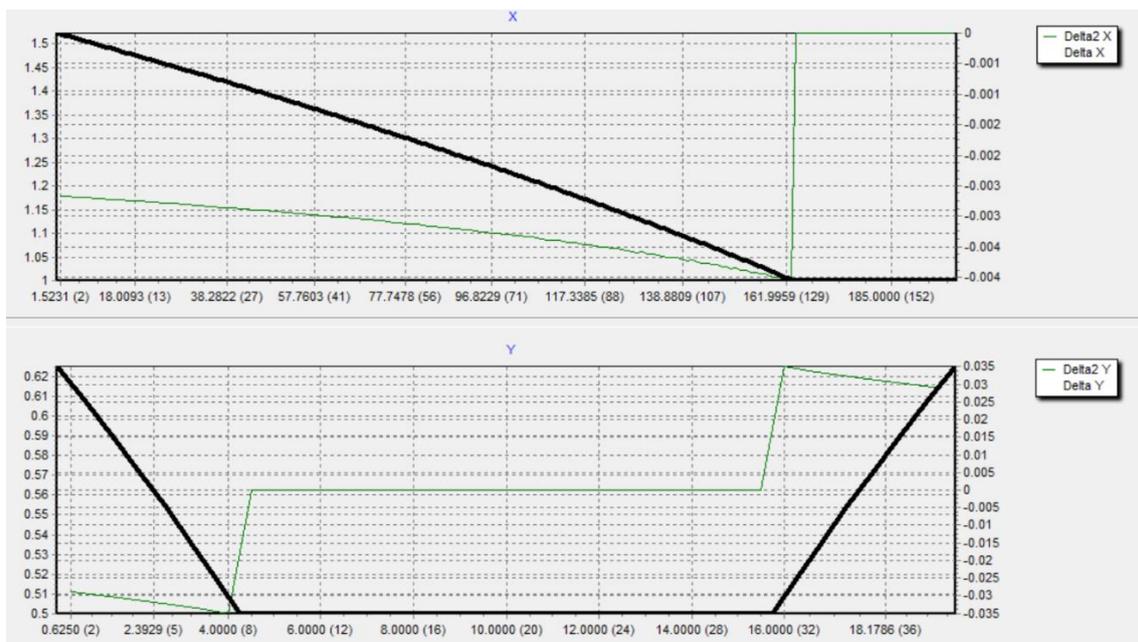


Figura 57: Mallado variable en el tanque de ensayo dique tramo I

Una vez presentado las características del ensayo se procede a realizar los ensayos. En la tabla 14 se muestra las características de los ensayos y los resultados de interés obtenidos tras el postproceso.

Para este tramo I se opta por seguir con la misma formulación para el caudal medio de rebase del Eurotop, ajustando y modificando el correspondiente a la fricción de fricción del material. Este parámetro se tomó como constante en el cálculo del caudal medio de rebase en el estudio histórico, pero este puede ir variando con la incidencia del oleaje y modifica como rebasa la ola incidente. Es por ello, que se calcula como variable de postproceso.

La otra variable de postproceso es el número de olas rebasadas, a partir de la cual se obtendrá la formulación modificada.

EXPERIMENTOS IH2VOF DIQUE 1 (TRAMO I)						
Número de caso	Hs (m)	Tp (s)	Nivel (m)	Nw	Now IH2VOF	Parámetro de fricción
1	2.01	9.55	1.02	472	2	0.488
2	2.56	9.63	0.15	468	0	-
3	4.89	9.97	1.72	452	192	0.308
4	2.61	11.63	1.4	387	42	0.497
5	3.06	10.77	1.42	418	44	0.4172
6	3.11	10.86	1.35	415	52	0.4359
7	2.61	11.11	0.507	406	7	0.4714
8	3	9.12	1.66	494	59	0.4191
9	2.7	11.44	0.45	394	0	-
10	2.18	7.55	0.87	602	0	-
11	4.62	10.87	0.49	414	25	0.26905
12	1.98	7.18	1.54	627	1	0.2753
13	3.51	8.78	0.36	513	0	-
14	3.84	9.79	1.06	460	65	0.4994
15	1.87	6.77	1.21	665	0	-
16	3.06	8.16	0.3	552	0	-
17	4.51	9.65	1.51	467	155	0.3756
18	4.99	10.91	1.53	413	197	0.3718
19	2.91	8.45	0.52	533	3	0.3648
20	2.59	10.12	0.32	445	0	-

Tabla 14: Resultados de las simulaciones IH2VOF para el dique tramo I

En la tabla 14 se observan los oleajes que se han simulado en el IH2VOF y los resultados que han arrojado tras las ejecuciones. Se puede diferenciar el número de olas rebasadas, obtenidas mediante un sensor de rebase en el centro de la base de la coronación del dique (figura 58).

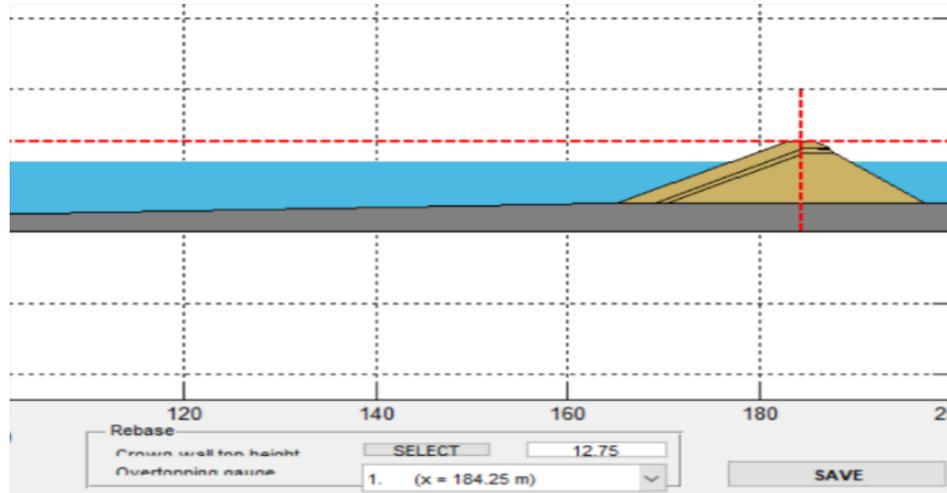


Figura 58: Posición del sensor de rebase

Se obtiene el parámetro de fricción del dique, que depende del francobordo, del tamaño de la escollera y de la altura de ola incidente a pie de dique.

Tras el estudio de los resultados, se obtienen las siguientes expresiones para calcular el rebase (en base a ecuación 6) y el porcentaje de olas rebasadas. Se puede observar la curva de la formulación en la figura 59.

$$\frac{q}{\sqrt{g} H_{mo}^3} = 0.09 \exp \left[\left(1.5 \frac{R_c}{H_{mo} \gamma_f \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right]$$

El parámetro de fricción ajustado sigue una distribución Weibull:

$$\gamma_f = a b \left(\frac{R_c D_n}{H_{mo}^2} \right)^{(b-1)} e^{-a \left(\frac{R_c D_n}{H_{mo}^2} \right)^b} \quad \text{Eq (18)}$$

Siendo:

- $a = 0.5762$ $\sigma(a) = 0.0391$
- $b = 1.322$ $\sigma(b) = 0.075$

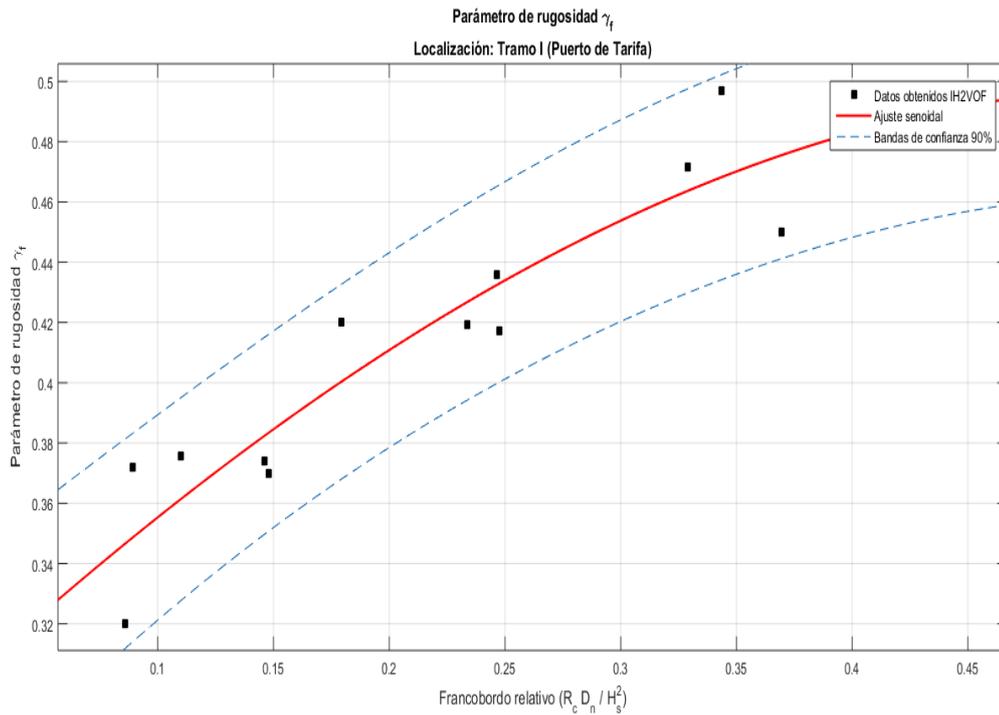


Figura 59: Curva de ajuste para el coeficiente de fricción del material

En cuanto a la expresión de número de olas rebasadas se ha obtenido la siguiente expresión:

$$\frac{N_{ow}}{N_w} = 12,69 \left(\frac{R_c L_o}{H_{mo}^2} \right)^{-1.291} \quad \text{Eq (19)}$$

Siendo:

- N_{ow} : Número de olas rebasadas
- N_w : Número de olas del estado de mar
- R_c : Francobordo (m)
- L_o : Longitud de onda en aguas profundas
- H_{mo} : Altura de ola a pie de dique
- $\sigma(12.69) = 1.025$ y $\sigma(-1.291) = 0.167$

La expresión viene deducida de los datos de los experimentos en la sección del tramo I, la gráfica de resultados se muestra en la figura 60:

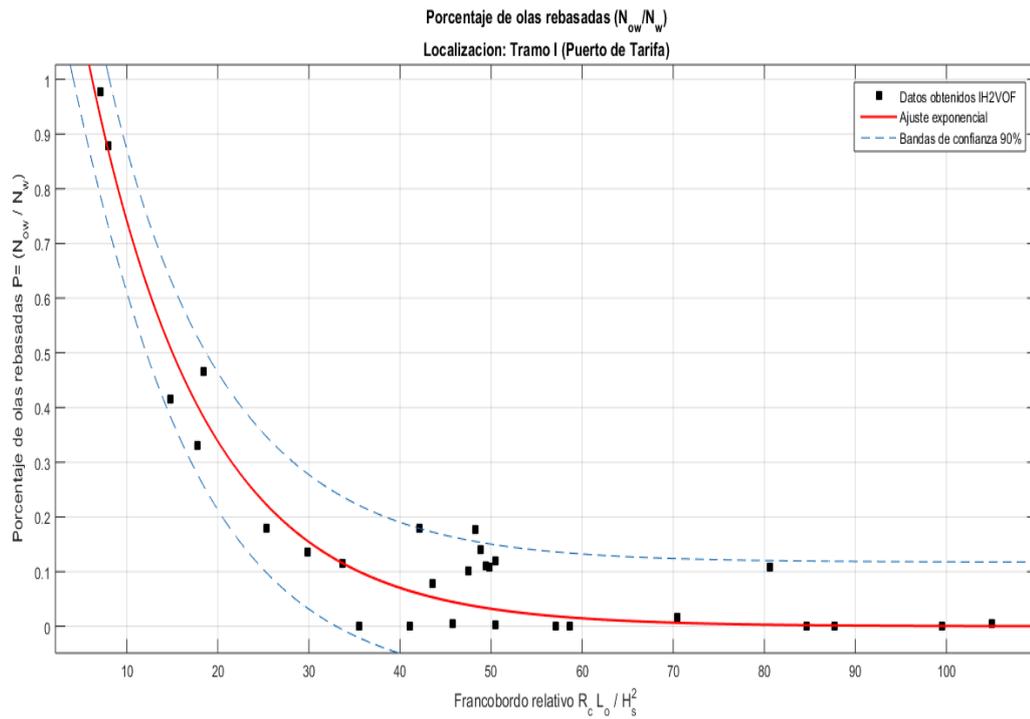


Figura 60: Ajuste porcentaje de olas rebasadas para tramo I

Para cuantificar el posible incremento del nivel del mar, se procede al montaje y realizar ensayos en el modelo IH2BOUSS.

El montaje del modelo IH2BOUSS tiene las siguientes características:

- Batimetría: Zona próxima al dique objeto de estudio (figura 61)

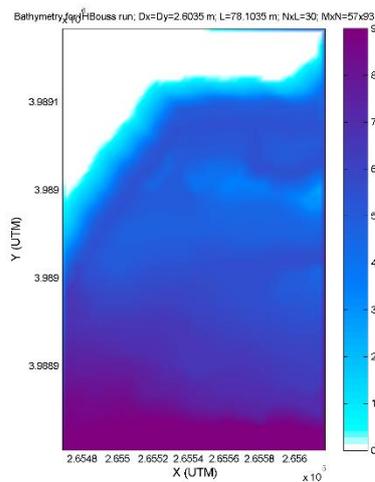


Figura 61: Batimetría introducida en modelo IH2BOUSS

- La línea de generación de oleaje se sitúa a la misma distancia del pie de dique que se generó en las palas del IH2VOF. Esto es en la coordenada UTM 3988899.3064 m paralelo al eje X, ya que para asegurar que el oleaje va perpendicular (mismas condiciones que IH2VOF) se ha girado la batimetría.
- Resolución de puntos por longitud de onda: 30.
- El forzamiento es el mismo oleaje irregular que en el IH2VOF como se muestra en la tabla 15.

Se conserva de los oleajes a simular la serie de oleaje que este modelo crea para su introducción en el modelo Boussinesq para una correcta comparación. Los oleajes que se van a simular y sus características son los siguientes:

Oleaje simulado	Hs (m)	Hmedia (m)	Hmáx (m)	Tp (s)	Tm (s)	Duración (s)
1	1.94	1.18	3.58	10.52	7.64	300
2	1.57	1.08	2.66	10.06	7.67	200
3	1.01	0.73	1.77	10.3	7.79	200
4	0.49	0.31	0.89	10.41	8	200
5	2.99	1.75	5.26	10.64	7.82	300

Tabla 15: Oleajes simulados en IH2VOF y IH2BOUSS

- Todos los experimentos se realizan en BMVE (nivel es igual a 0).
- Punto de control: frente al dique al igual que IH2VOF (respetando las dimensiones del tanque). Con coordenadas UTM (tabla 16).

Punto de control	Coordenada x	Coordenada y
P1	265553.0847	3989027.098

Tabla 16: Punto de control para IH2BOUSS

A continuación, se muestra la pantalla de ejecución del IH2BOUSS (figura 62). Todas las variables que aparecen serán constantes en todos los ensayos. Tras ajustar los valores de los parámetros para la correcta simulación del ensayo, estos son los resultantes:

- Esponjas de absorción de oleaje: Se disponen esponjas en consonancia con la geometría y con la posterior ejecución y evitar errores de "overflow".
 - ✓ Margen derecho: $0,15 \cdot L$
 - ✓ Margen izquierdo: $0,15 \cdot L$
 - ✓ Margen inferior: $0,25 \cdot L$

Siendo L longitud de onda de la ola incidente.

- Número de Courant ($dx/dt \cdot C_0$): Coeficiente entre la velocidad física de propagación y la velocidad numérica. En estos ensayos se fija en 0.1.
- Parámetro de rotura: Se mantiene en 0.55.
- Delta en la línea de generación de oleaje: 0.3
- Coeficiente de escala de disipación: 0.2

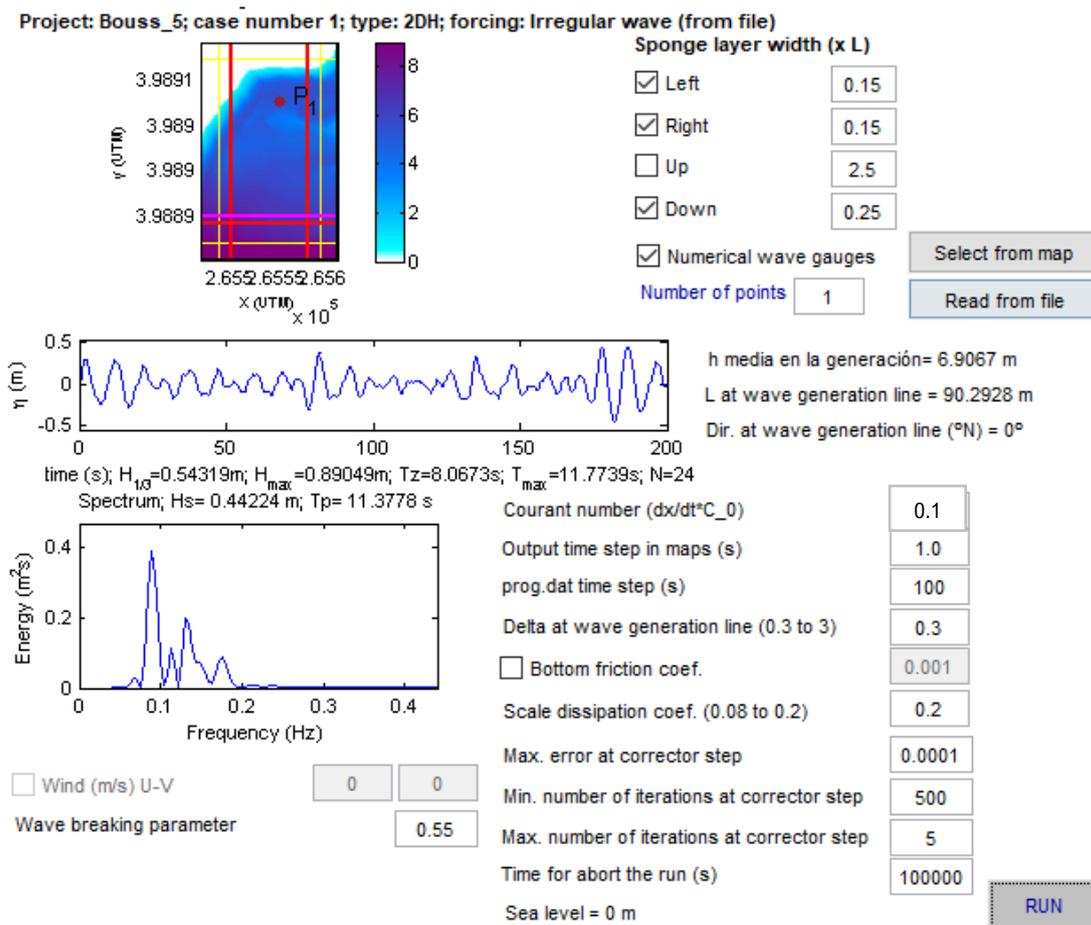


Figura 62: Resumen de ejecución IH2BOUSS

Una vez montados los casos de estudio, se lleva a cabo la ejecución y posterior comparación de las series registradas por el punto de control con las del IH2VOF.

En la figura 63 se muestra unos mapas a modo de ejemplo de ejecuciones en 2DH para observar el efecto de la acumulación de agua frente al tramo I.

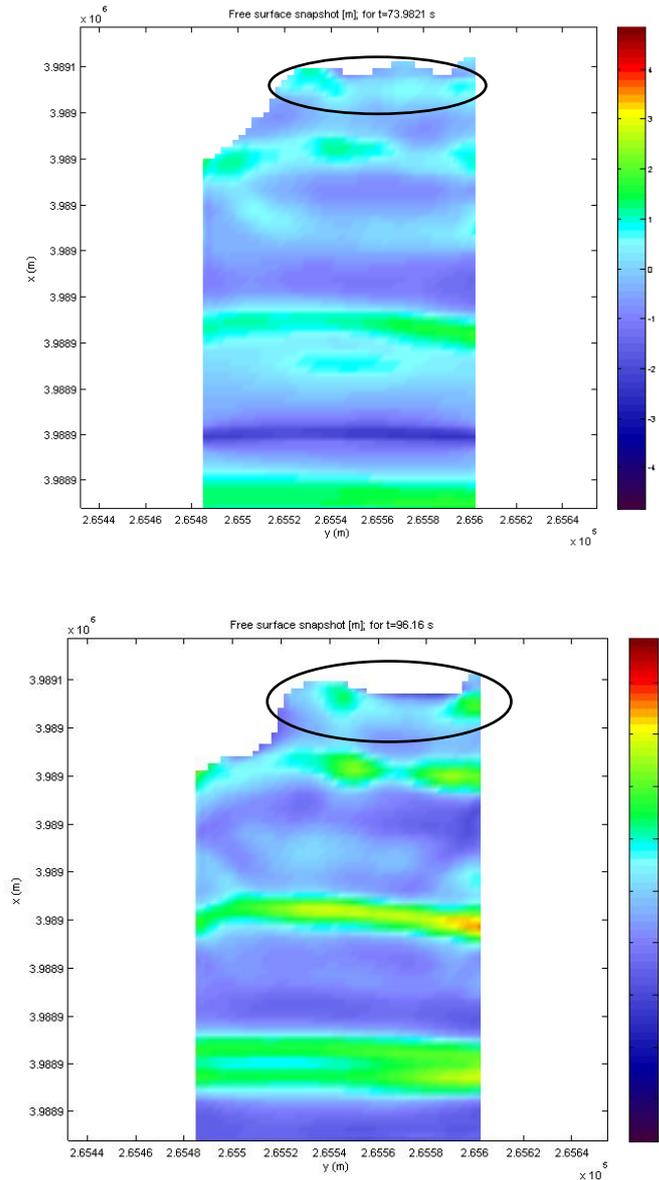


Figura 63: Ejecuciones ejemplo IH2BOUSS

En la figura 63 se puede observar la acumulación de agua que se forma a pie de dique entre dos oleajes consecutivos, esto supone un incremento del nivel y un aumento de número de olas rebasadas sobre el dique.

Realizados todos los ensayos para cada uno de los oleajes propuestos, la comparación con los registros provenientes del modelo IH2VOF se muestra en la figura 64:

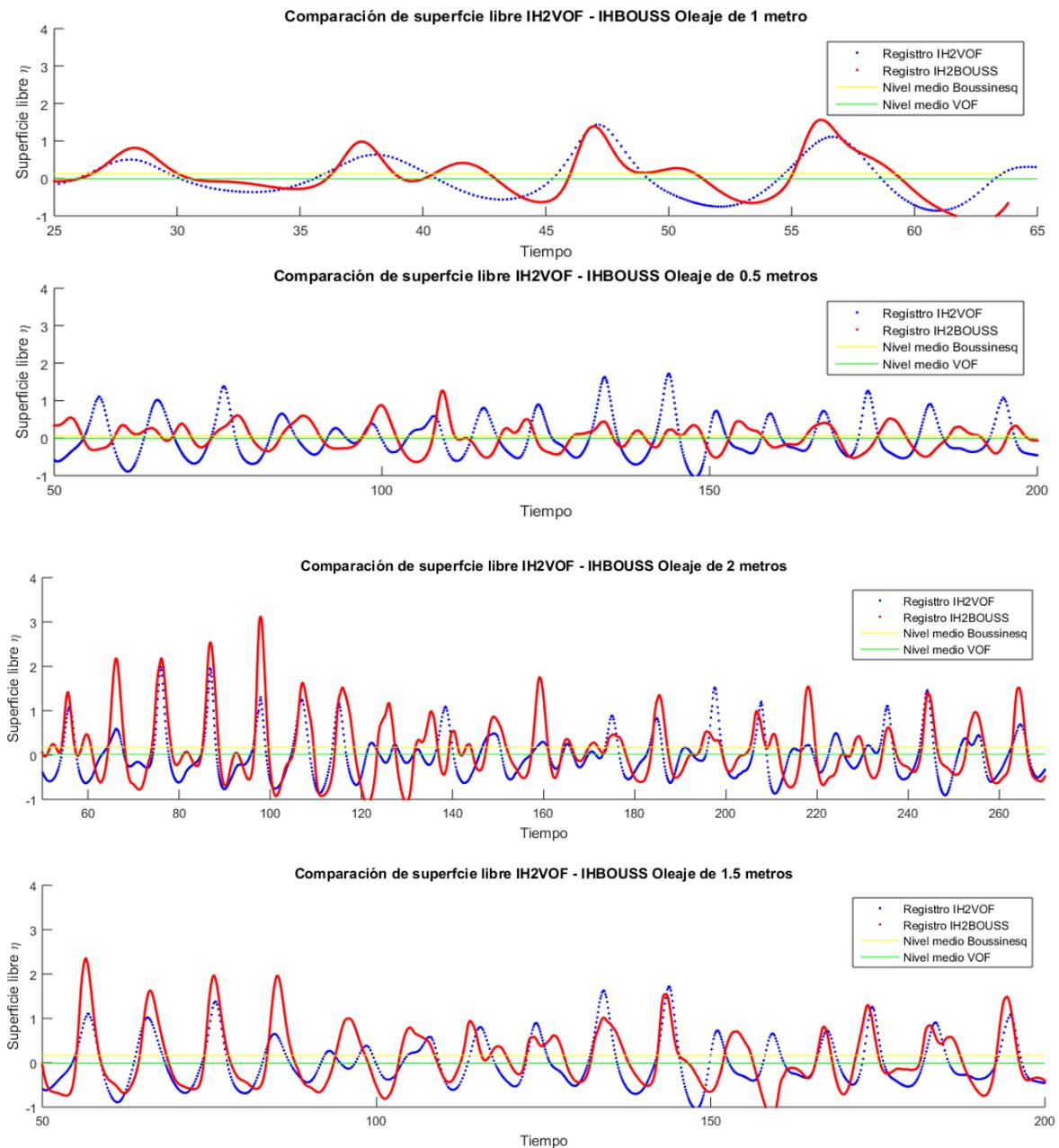


Figura 64: Comparación de series obtenidas en IHBOUSS con las obtenidas en IH2VOF

Como se puede observar hay un aumento del nivel del mar en todos los casos, por lo tanto, la hipótesis se confirma de esta manera. Obsérvese que en la simulación del oleaje de 1 metro la simulación es de menor tiempo ya que modelo presentaba dificultades de ejecución y se optó por una simulación más corta.

Para incluir este efecto en la fórmula modificada para el número de olas rebasadas, se ha realizado un ajuste lineal con los resultados arrojados por la comparación anterior (tabla 17).

Incremento de nivel obtenidos mediante IH2BOUSS	
Caso	Incremento de nivel Boussinesq (m)
1	0.1774
2	0.1637
3	0.1239
4	0.0803

Tabla 17: Resultados de incrementos de nivel

La expresión de la curva es la que se muestra en la figura 65:

$$\Delta Nivel = 0.0451 H_s + 0.06617 \quad \text{Eq (14)}$$

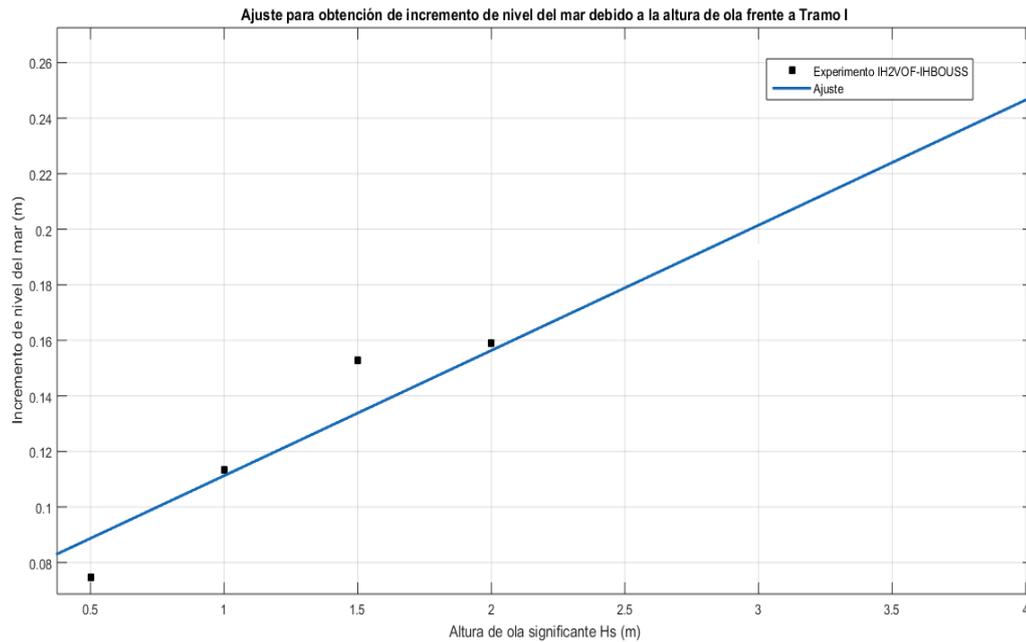


Figura 65: Ajuste para incremento del nivel del mar

De esta manera, haciendo uso de ambas expresiones para el rebase (las formulaciones mejoradas en este capítulo), una para el caudal q (l/s) y otro para el número de olas rebasadas, se comparan con los resultados presentados en el capítulo 5 (empleando las formulaciones del manual Eurotop tradicionales).

Porcentaje de ocurrencia		Número medio de eventos o número de paradas		Caudal medio mensual q (l/s)		Máximo medio mensual q (l/s)	
Fórmula Eurotop	Fórmula propuesta	Fórmula Eurotop	Fórmula propuesta	Fórmula Eurotop	Fórmula propuesta	Fórmula Eurotop	Fórmula propuesta
5.8191	5.0675	43	40	3.3765	0.9008	2137.9638	808.3488
6.6331	6.0657	48	36	1.9317	0.5193	1368.7402	386.3232
8.6734	6.5469	65	49	3.7166	1.0168	2621.1450	937.9612
4.6841	4.1356	28	24	1.1661	0.3163	1625.0914	516.4099
3.4086	3.1265	25	20	0.0797	0.0397	468.4735	93.8256
1.8118	1.0396	13	9	0.0243	0.0117	286.3177	57.2131
1.6353	0.9573	12	7	0.0044	0.0039	10.0084	5.0244
1.2301	0.7684	9	3	0.0084	0.0060	21.5158	8.2063
1.532	0.8940	11	8	0.0437	0.0180	131.6033	31.9386
2.9959	2.6543	22	17	0.2449	0.0728	579.6078	155.4280
4.7627	3.9785	34	29	0.5817	0.1714	981.9651	220.1030
5.9149	5.0937	43	38	1.7151	0.4614	1014.2752	318.6454

Tabla 18: Comparación series históricas con ambas formulaciones para el caudal medio de rebase para dique tramo I

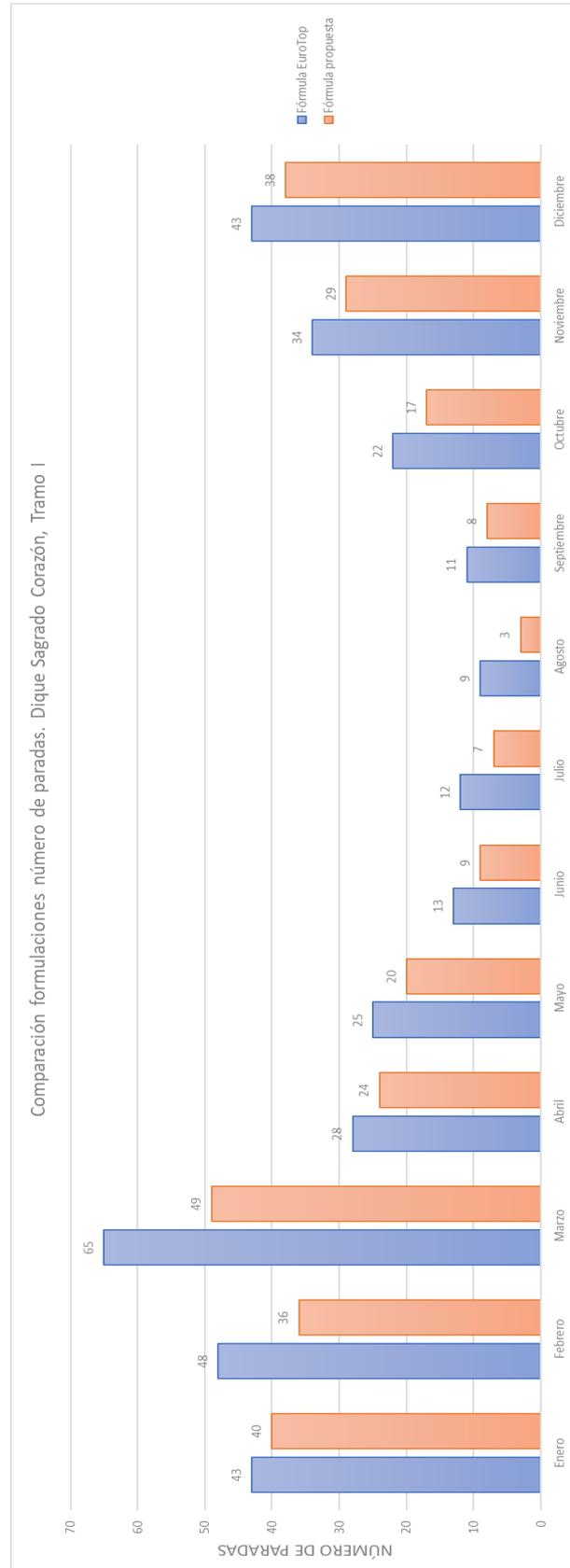


Figura 66: Gráfica comparativa entre ambas formulaciones número de paradas para dique tramo I

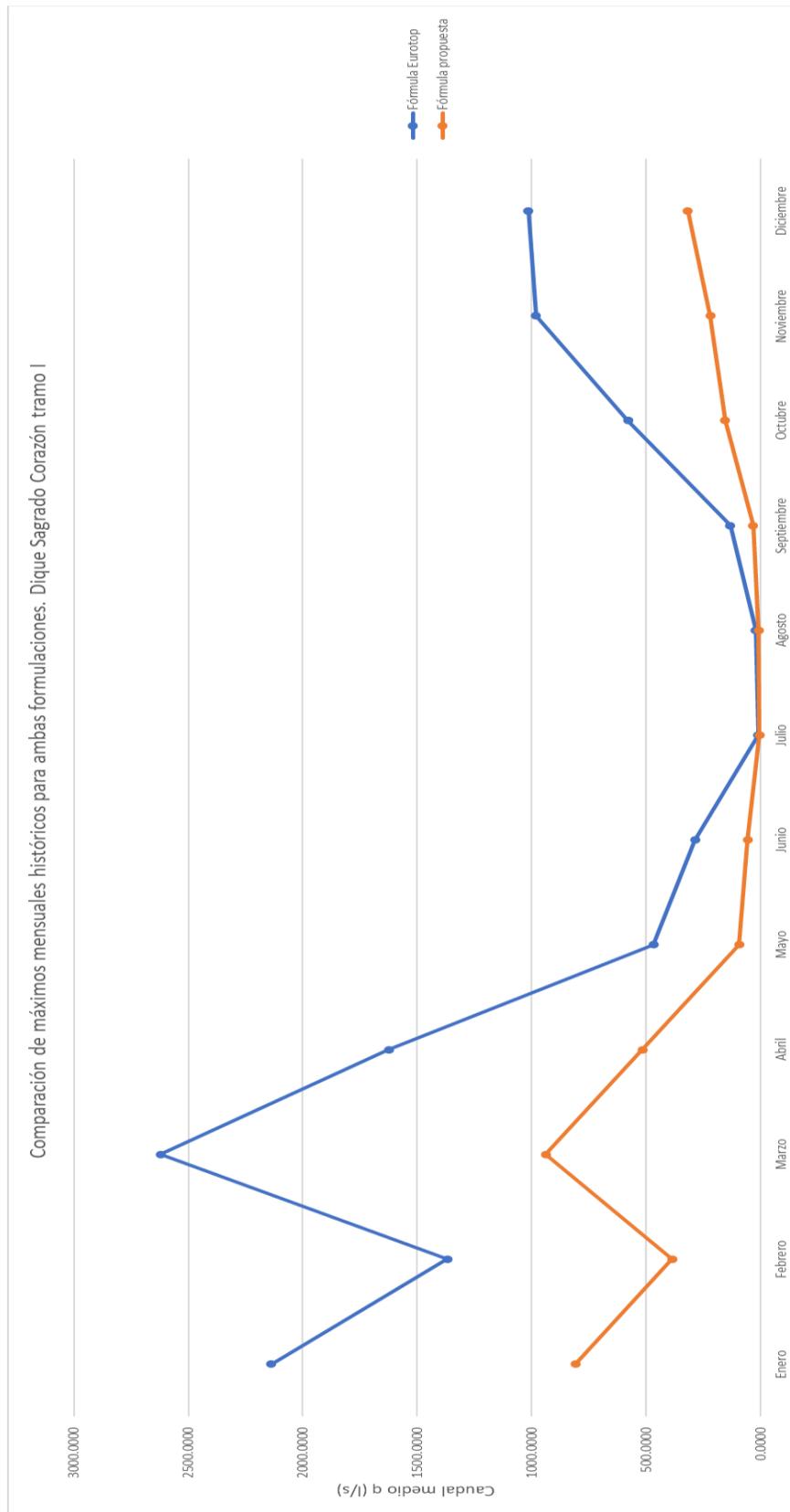


Figura 67: Gráfica comparativa para el caudal máximo medio mensual para tramo I

En la tabla 18 y en la figura 66, se puede observar la diferencia entre los resultados de rebase entre las dos formulaciones (Eurotop y formulación modificada). La modificada, reduce el porcentaje de eventos de rebase, el caudal medio de rebase y el número de olas rebasadas medias como se puede observar en el análisis mensual. Esto es debido a la implementación del factor de fricción variable y del periodo.

Lo mismo se observa en la figura 67, los picos de rebases máximos medios mensuales se reducen de manera significativa, produciéndose un descenso, por ejemplo, de 150000 l/s en febrero, siendo este el más acusado.

7.2) Dique Sagrado Corazón tramo VII

La sección objeto de ensayo para este tramo dibujada y caracterizada en IH2VOF se muestra en la figura 68.

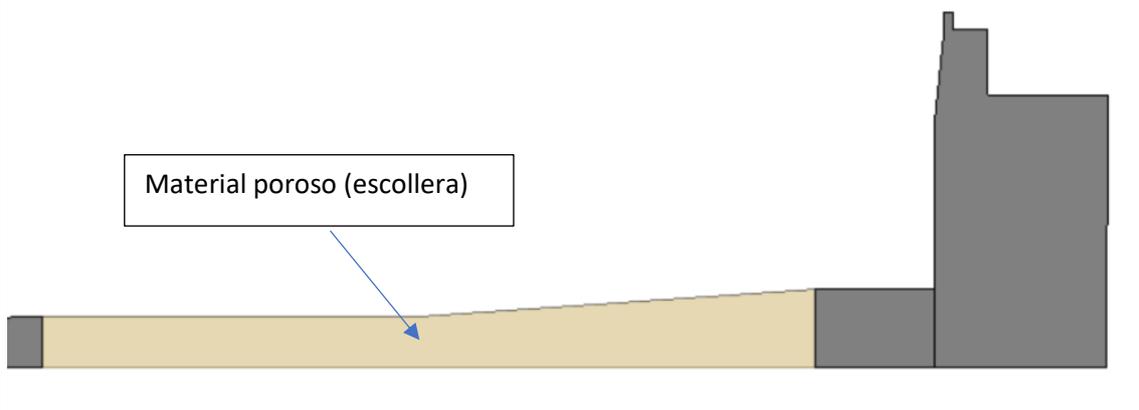


Figura 68: Sección IH2VOF para el dique tramo VII

La sección de la estructura está simulada mediante obstáculos, sin porosidad como hormigón. Se dispone una zona porosa tal y como se puede observar en la figura 49, que corresponde a la escollera de defensa. Las características de esta zona son las que se muestra en la tabla 19:

Característica	Material poroso
Porosidad (%)	30
Coeficiente fricción lineal	200
Coeficiente de fricción no lineal	1.10
Coeficiente de masa	0.34
Dn50 (m)	0.50

Tabla 19: Características del material poroso

En la tabla 20 se muestra las características del tanque de ensayo:

Dimensión	Cantidad (m)
Largo	250
Altura	40
Altura del agua pie de dique (BMVE)	8.4

Tabla 20: Dimensiones del tanque para dique tramo VII

Para el mallado del modelo, se opta por una malla variable tanto a lo largo del eje x como de y.

Estas características de mallado se pueden observar en la figura 69:



Figura 69: Mallado tanque para ensayo dique tramo VII

Una vez presentado las características del ensayo se procede a realizar los ensayos. En la tabla 21 se muestra las características de los ensayos y los resultados de interés obtenidos tras el postproceso.

EXPERIMENTOS IH2VOF DIQUE 2 (TRAMO VII)					
Número de caso	Hs (m)	Tp (s)	Nivel (m)	Nw	Now IH2VOF
1	4.5	11.15	0.396	404	40
2	4.04	11.66	0.467	386	41
3	3.07	9.17	0.519	491	1
4	5.25	10.53	1.489	428	98
5	4.61	9.95	1.722	453	70
6	4.91	11.49	1.43	392	99
7	4.14	9.61	1.46	468	42
8	3.89	9.64	1.413	467	30
9	3.54	9.03	1.3	498	8
10	3.01	7.67	1.44	587	1
11	2.77	8.25	1.42	546	1
12	3	9.71	0.522	464	2
13	2.7	9.46	0.57	476	0
14	2	9.47	1.19	475	0
15	4.78	11.18	0.7	403	65
16	4.03	9.65	1.51	467	41
17	3	7.67	1.44	587	1

Tabla 21: Resultados de las simulaciones IH2VOF

En la tabla 21 se observa los oleajes que se han simulado en el IH2VOF y los resultados que han arrojado tras las ejecuciones. Se puede diferenciar el número de olas rebasadas, obtenidas mediante un sensor de rebase en el centro de la base del espaldón del dique (figura 70).

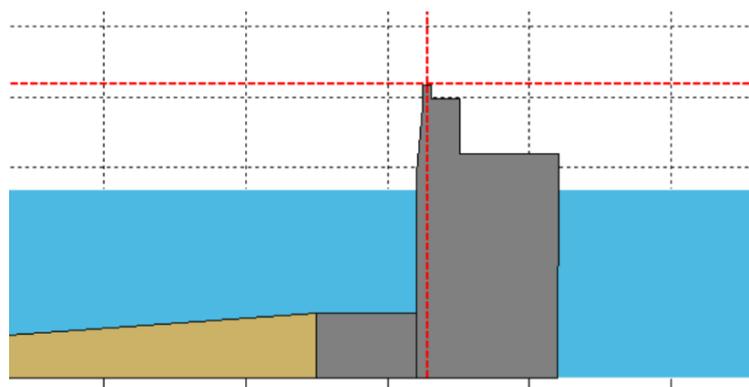


Figura 70: Sensor de rebase sobre el dique tramo VII

Tras el estudio de los resultados obtenidos, la formulación para el caudal medio de rebase sobre este tramo se muestra en las figura 71.

$$\frac{q}{\sqrt{g} H_{mo}^3} = 0.167 \exp \left[- \left(2.087 \frac{R_c}{H_{mo}} \right) \right] \quad \text{Eq (20)}$$

Donde:

- q : Caudal de rebase (m^3/s)
- R_c : Francobordo (m)
- H_{mo} : Altura de ola significativa a pie de dique
- Coeficientes:
 - $\sigma(0.167) = 0.05$
 - $\sigma(2.087) = 0.35$

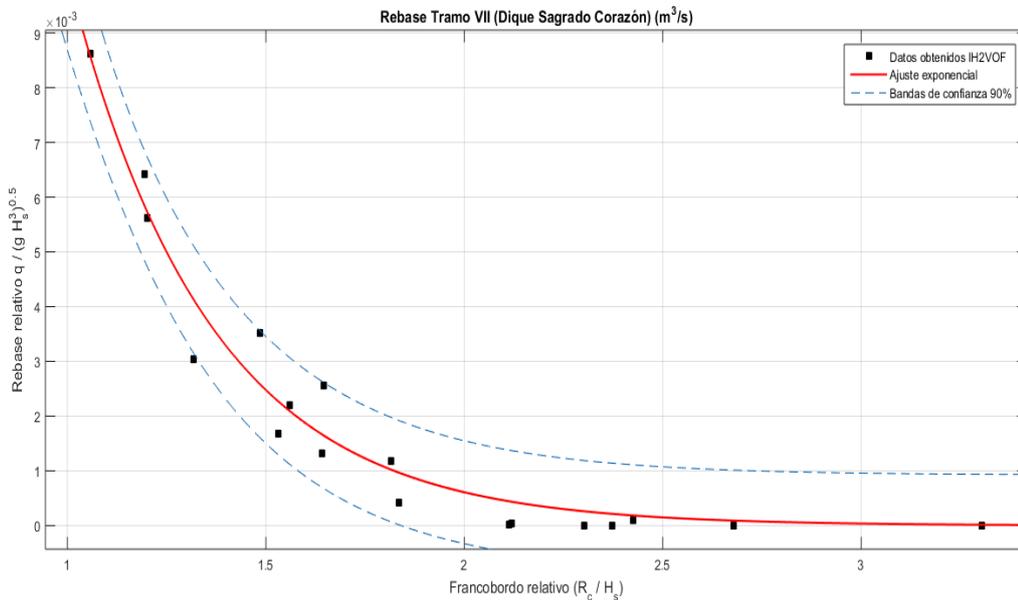


Figura 71: Ajuste caudal medio de rebase sobre dique tramo VII

Por otro lado, se presenta la formulación para obtener el número de olas rebasadas sobre el tramo VII y el ajuste de la figura 72.

$$\frac{N_{ow}}{N_w} = 1.02 \exp \left[- \left(0.038 \frac{R_c L_o}{H_{mo}^2} \right) \right] \quad \text{Eq (21)}$$

Donde:

- N_{ow} : Número de olas rebasadas
- N_w : Número de olas del estado de mar

- R_c : Francobordo (m)
- H_{mo} : Altura de ola significativa a pie de dique
- L_o : Longitud de onda en aguas indefinidas
- Coeficientes:
 - $\sigma(1.02) = 0.2$
 - $\sigma(0.038) = 0.008$

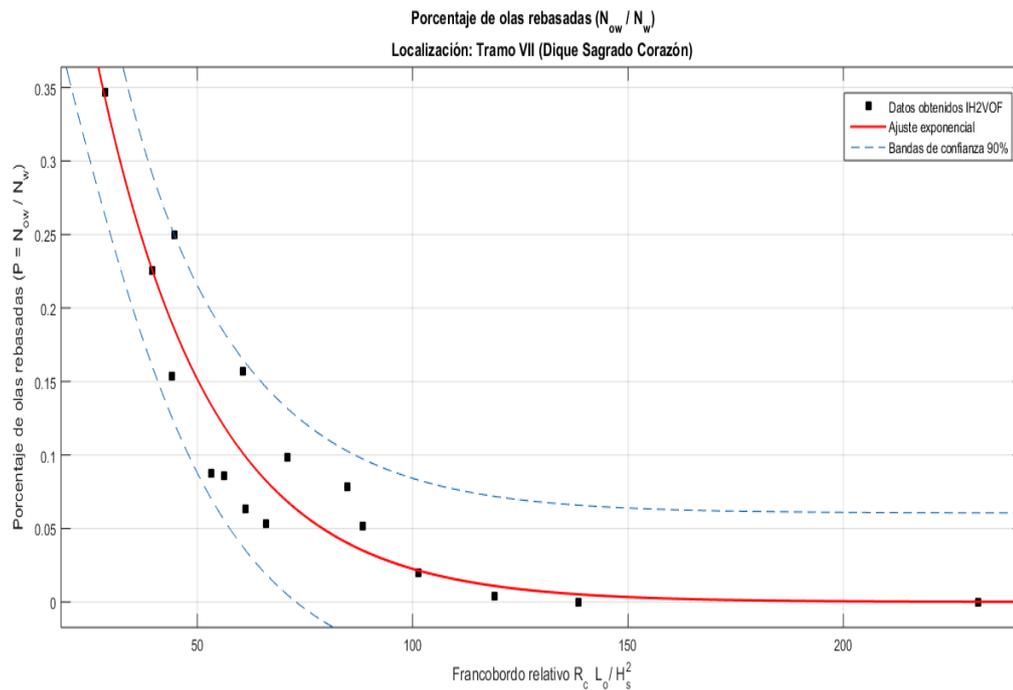


Figura 72: Ajuste para porcentaje de olas rebasadas para dique tramo VII

De esta manera, haciendo uso de ambas expresiones para el rebase, una para el caudal q (l/s) y otro para el número de olas rebasadas, se obtienen comparaciones con la serie histórica obtenidas mediante las formulaciones propuestas con el Eurotop.

Tiempo		Porcentaje de ocurrencia		Número medio de eventos o número de paradas		Caudal medio mensual q (l/s)		Máximo medio mensual q (l/s)	
Mes	Fórmula Eurotop	Fórmula propuesta	Fórmula Eurotop	Fórmula propuesta	Fórmula Eurotop	Fórmula propuesta	Fórmula Eurotop	Fórmula propuesta	Fórmula propuesta
Enero	0.8783	4.2132	6	20	0.014265	0.2627	33.5728	77.8574	
Febrero	1.0769	5.1345	8	25	0.005591	0.1380	22.0855	65.8476	
Marzo	1.3173	6.6974	10	22	0.002838	0.1064	15.6768	50.8660	
Abril	0.7594	3.8604	3	14	0.000399	0.0234	1.0958	11.3850	
Mayo	0.1208	2.5466	1	5	0.000045	0.0071	0.5909	8.9056	
Junio	0.0229	1.0703	0	3	0.000011	0.0019	0.3262	5.8475	
Julio	0.0061	0.8789	0	1	0.000001	0.0007	0.0130	1.0968	
Agosto	0.0184	0.7272	0	1	0.000003	0.0011	0.0221	1.2347	
Septiembre	0.0444	0.8959	0	3	0.000262	0.0080	3.2166	31.7467	
Octubre	0.1533	1.8171	1	7	0.002832	0.0534	32.8765	37.8940	
Noviembre	0.4776	3.0751	3	9	0.006586	0.1300	25.5971	40.9673	
Diciembre	0.7059	4.3622	5	15	0.021099	0.3619	44.6534	70.9586	

Tabla 22: Gráfica comparativa de la serie histórica para ambas formulaciones número de paradas para dique Sagrado Corazón tramo VII

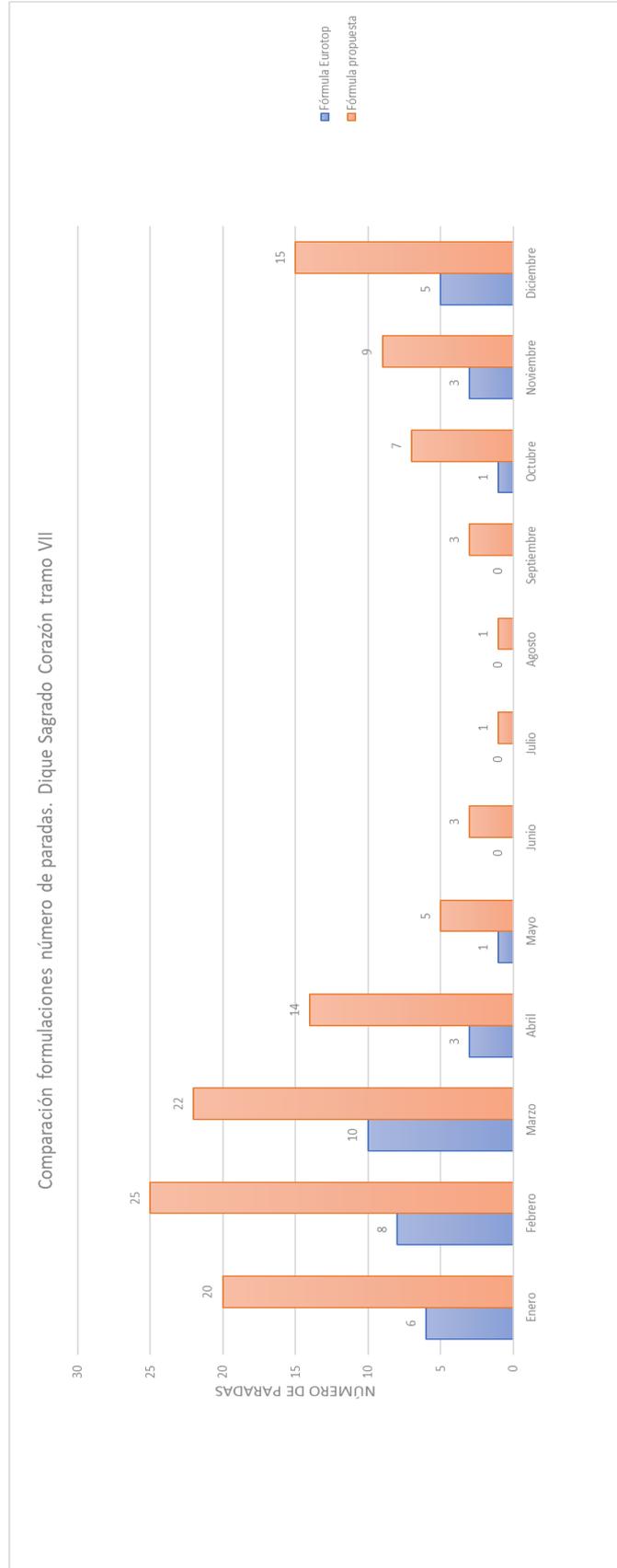


Figura 73: Comparación hindcast con ambas formulaciones para el caudal medio de rebase para dique tramo VII

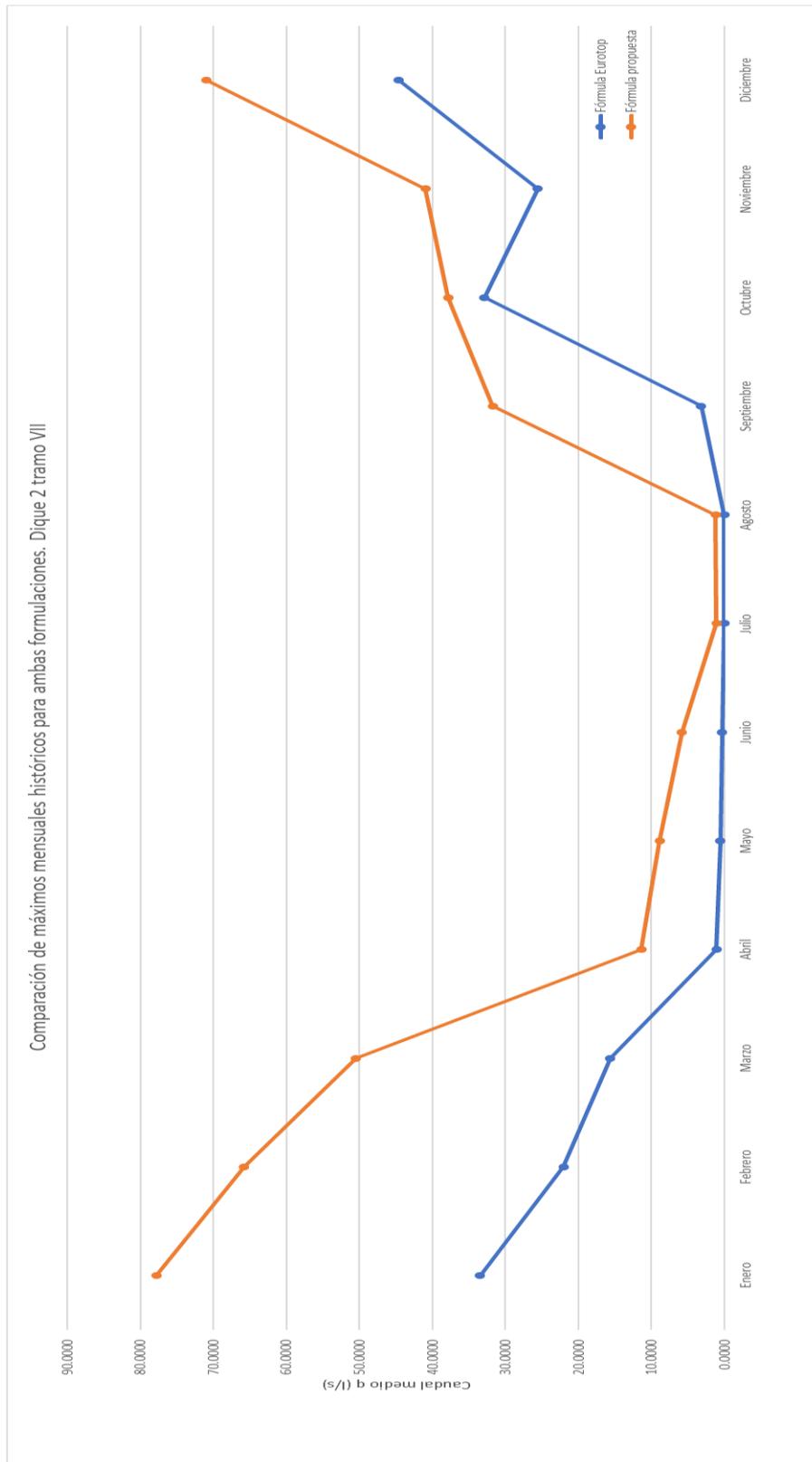


Figura 74: Comparación mensual de la media de caudal máximo de rebase para ambas formulaciones

Como se puede observar en la tabla 22 y en las figuras 73 y 74 tanto el número de paradas operativas como los máximos medios mensuales son mayores utilizando la formulación modificada que con la formulación clásica del Eurotop). El incremento del rebase obtenido con la ecuación modificada respecto a la clásica se acentúa en meses de invierno, donde se pueden observar picos de diferencia de 40 l/s (para el mes de marzo). La diferencia puede ser debida a:

- En la formulación del Eurotop puede no tener en cuenta los rebases producidos por el “splash” (cuando el dique está sometido a fuerzas impulsivas) de la ola cuando rompe sobre el dique.
- La fórmula del Eurotop es muy generalista para los eventos de rebase sobre diques verticales, con lo cual puede no describir correctamente los eventos de rebase sobre el dique.

Capítulo 8. Validación

En este capítulo se trata la validación de las formulaciones obtenidas en el capítulo 6, comparando estas con los datos instrumentales descritos en el capítulo 4.

8.1) Validación formulaciones para tramo I

Primero se comienza validando las formulaciones para el dique Sagrado Corazón tramo I. Para validar la formulación de caudal medio de rebase, se adopta la hipótesis: un estado de mar con mayores olas rebasadas, mayor será la tasa de caudal de rebase. Teniendo en cuenta esto, esta es la comparación para dicha variable:

Estado de mar 20/02/2017	N rebases	q rebase (l/s)
10:00:00	81	1.1836
11:00:00	128	1.6759
12:00:00	123	1.2654
13:00:00	34	0.7367
14:00:00	43	0.7212
15:00:00	74	0.8523
16:00:00	59	0.6949
17:00:00	46	0.6876

Tabla 23: Comparativa número de olas rebasadas con el caudal medio de rebase para dique tramo I

Validación de datos de caudal medio de rebase tramo I

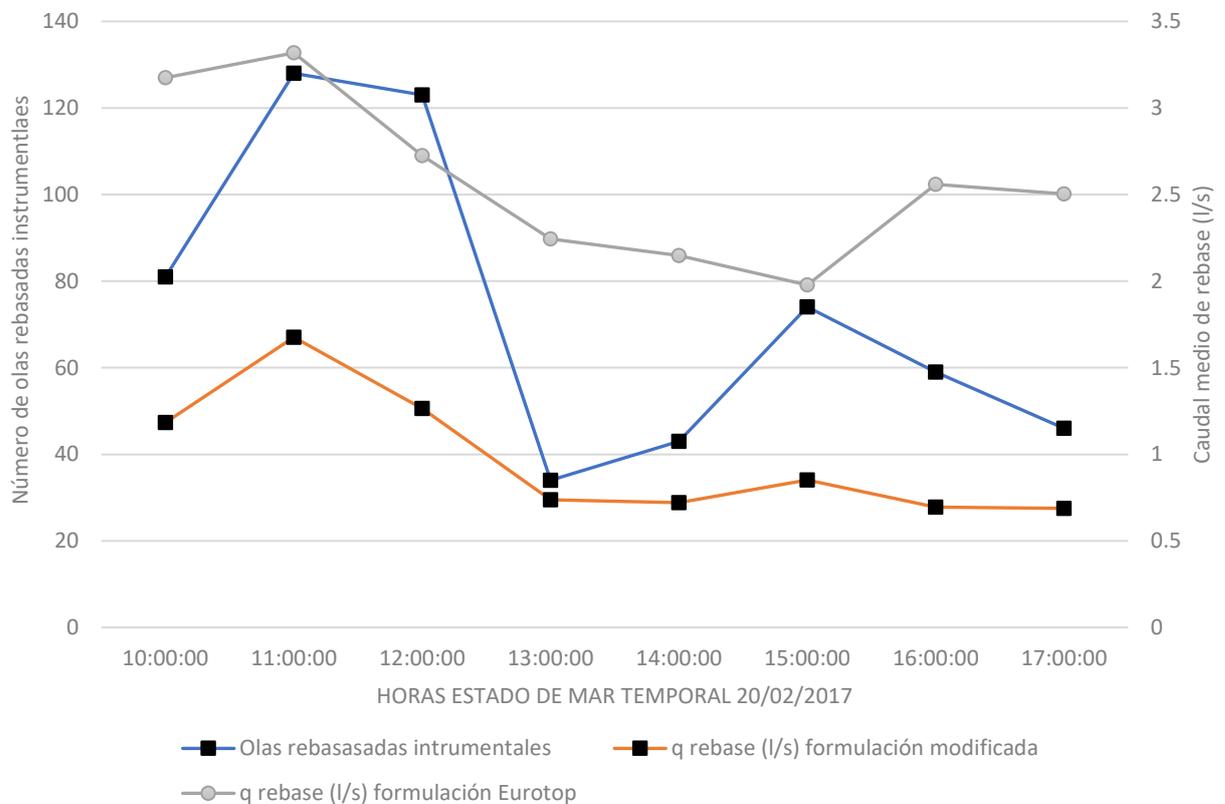


Figura 75: Validación caudal medio de rebase dique tramo I

Observando la figura 75, los picos de olas rebasadas de la gráfica coinciden en mayor con los picos del caudal medio de rebase para la formulación propuesta que con la fórmula tradicional del Eurotop. Con lo cual, teniendo en cuenta la falta de datos instrumentales para validar correctamente el caudal medio de rebase, se considera un buen comportamiento de la fórmula modificada asumiendo la hipótesis desarrollada al principio de este subapartado.

En cuanto a la variable del número de olas rebasadas la validación se muestra los resultados en la figura 76, haciendo uso de la fórmula modificada e incluyendo el efecto estudiado de incremento de nivel del mar.

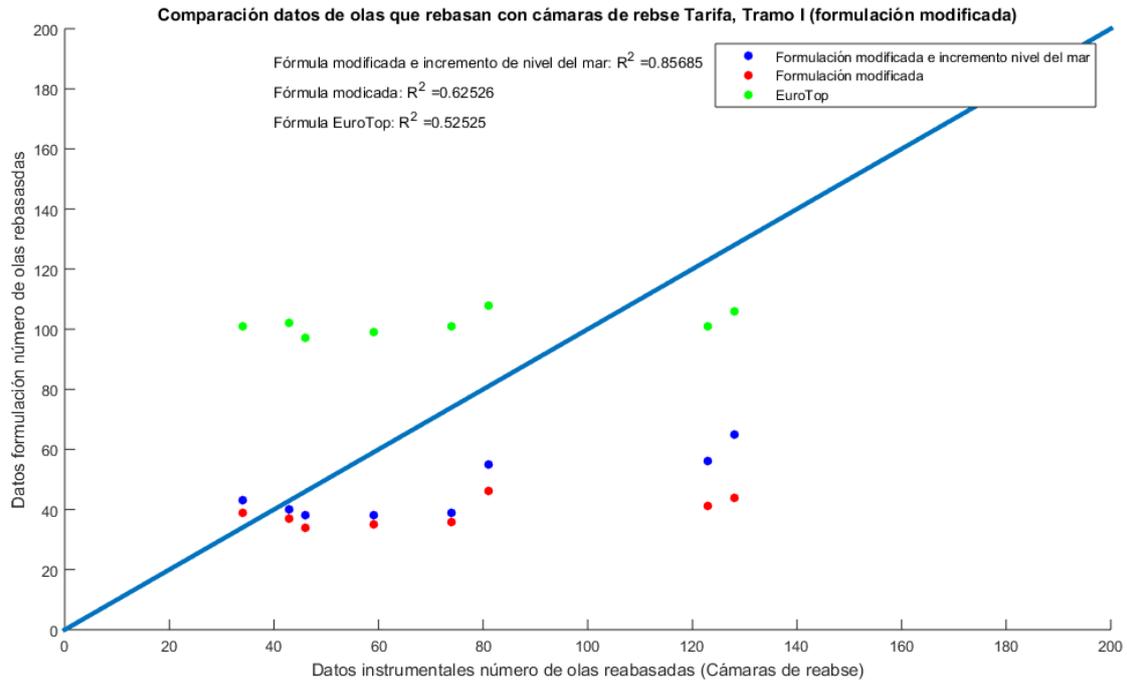


Figura 76: Comparación con datos instrumentales de olas que rebasan en el tramo I

Como se observa en la figura 76, comparando los coeficientes de correlación en primera instancia de los resultados obtenidos por el Eurotop con los arrojados por la fórmula modificada, se puede apreciar un incremento de la fiabilidad de la ecuación modificada de un 10%. En esta se incluyen efectos del periodo (variable incluida en la longitud de onda) y los efectos de fricción. En este aspecto la fricción mejora los datos que inicialmente, empleando la formulación del Eurotop, se encontraban en la parte izquierda del gráfico, y que con la formulación modificada se acercan más a la convergencia con los datos instrumentales. Tras la aplicación de la formulación modificada, se puede observar en la figura 76 que se han desplazado los datos de la derecha, con lo cual la formulación no se comporta bien para los oleajes con mayor número de olas rebasadas de los datos instrumentales.

Es por ello, como se indicó en el capítulo 5, que el incremento del nivel del mar es un elemento fundamental ya que habría más olas rebasadas. Tras la aplicación de la formulación incremento de nivel del mar y la fórmula modificada, los datos del gráfico experimentan un incremento en número de olas rebasadas. De esta manera, se obtiene una correlación de los datos comparados con los instrumentales de un 85,6 %, lo cual muestra un alto grado de fiabilidad de la formulación modificada más el incremento del nivel del mar.

Tras la validación de las formulaciones modificadas, se puede concluir que la formulación, a pesar de que ha mejorado en un 33%, la fiabilidad de la fórmula original de Eurotop no simula bien el comportamiento de los oleajes que dan más rebases. Es por ello, que se proponen hipótesis que puedan llegar a aumentar más la fiabilidad de la fórmula modificada simulando correctamente esos oleajes:

- Velocidades de viento altas pueden llegar a empujar la masa de agua en el momento que esta se encuentra a la altura de la coronación del dique, por lo tanto, se propone la utilización de un modelo que pueda simular el viento en el rebase sobre estructuras.
- El estudio más detallado del periodo, el cual se ha demostrado que tiene efecto sobre el dique, puede que lleve a coeficientes mayores de aumento de rebase sobre el dique.

Aplicando a la formulación modificada estos parámetros de aumento de rebase como son el viento o el periodo (con un estudio más detallado), puede conllevar a que los puntos situados a la izquierda aumenten la convergencia con los datos instrumentales.

8.2) Validación formulaciones para tramo VII

A continuación, se lleva a cabo la validación del tramo VII. Para ello se realiza la comparación primero del caudal medio de rebase calculado mediante la fórmula modificada con el número de olas rebasadas medidas por las cámaras de rebase. De esta manera, se adopta la misma hipótesis que en el apartado 8.1. En la tabla 24 se muestra los datos instrumentales para este tramo.

Estado de mar 20/02/2017	N rebases	q rebase (l/s)
10:00:00	10	0.665
11:00:00	14	0.7901
12:00:00	7	0.5337
13:00:00	15	0.6719
14:00:00	8	0.5373
15:00:00	17	0.8705
16:00:00	5	0.8221
17:00:00	13	0.6984

Tabla 24: Comparativa número de olas rebasadas con el caudal medio de rebase para dique tramo VII

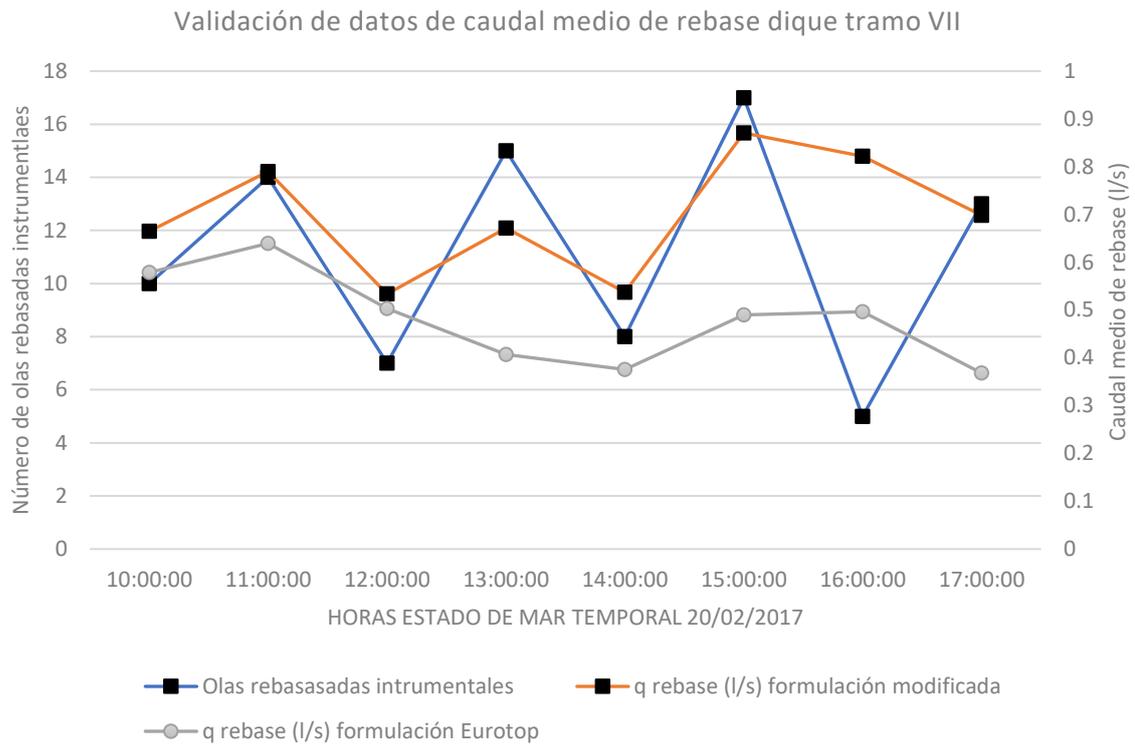


Figura 77: Validación caudal medio de rebase dique tramo VII

Como se puede observar en la figura 77, los picos de caudal medio de rebase calculado con la fórmula modificada coinciden de forma aproximada en todas las horas con la excepción del estado de mar de las 16 horas. Por otro lado, los caudales medios de rebase calculados con el Eurotop no se ajustan bien a los picos y a los valles de los datos instrumentales. De esta manera, teniendo en cuenta la falta de datos instrumentales para validar correctamente el caudal medio de rebase, se considera un buen comportamiento de la fórmula modificada asumiendo la hipótesis desarrollada al principio de este subapartado.

En cuanto a la variable del número de olas rebasadas la validación se muestra los resultados en la figura 78 haciendo uso de la fórmula modificada.

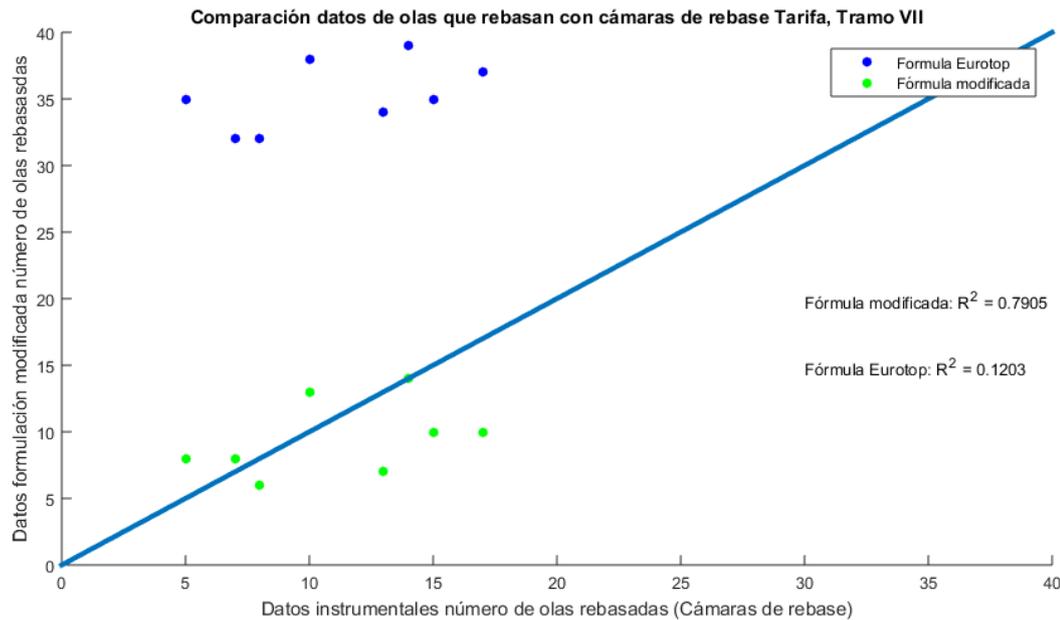


Figura 78: Comparación con datos instrumentales de olas que rebasan en el tramo VII

En la figura 78, se puede observar la convergencia de los datos con la formulación modificada en comparación con los datos instrumentales, la mejora con respecto a la formulación Eurotop es de un 67 %. La formulación se comporta aplicando fricción a los oleajes que con la formulación del Eurotop superaban los datos instrumentales, obligando a los datos a decrecer y situarse en el entorno de la línea de convergencia de datos.

A pesar de ello, los oleajes que en los datos instrumentales se registran más rebase, la fórmula modificada no los simula de forma que tenga más convergencia. Esto puede ser por no aplicación del viento en el modelo utilizado (el IH2VOF carece de entrada de viento), empujando el agua hacia el sensor de rebase registrando más olas rebasadas. Y al igual que en el tramo I, el periodo como se ha demostrado tiene influencia en el rebase, proponiendo un estudio más concreto sobre este efecto.

Por otra parte, también se deberían llevar a cabo más ensayos numéricos variando las características (en este estudio las características del dique se han mantenido constante) del dique para obtener una estadística de respuesta de la estructura frente al rebase.

Una vez validadas las formulaciones propuestas, estas se incluyen en el sistema de predicción el cual se explica con detalle en el siguiente apartado.

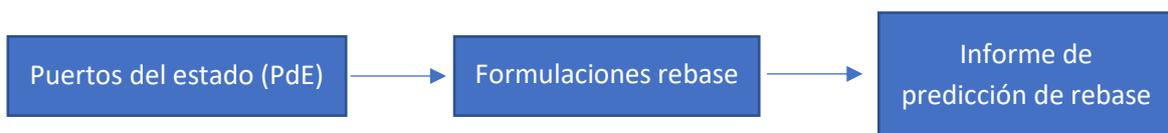
Capítulo 9. Sistema de predicción de rebase (forecast)

En este apartado se explica el diseño y la arquitectura del sistema de predicción para el Puerto de Tarifa. Un Sistema de predicción de rebase consiste en el cálculo de las variables fundamentales del rebase sobre estructuras de forma predictiva, es decir, a partir de la obtención de los datos de oleaje de la predicción obtener dichas variables.

El estudio del rebase tiene como principal aplicación el establecimiento de unos límites tolerables de flujo que pueda sobrepasar la estructura. Para minorar el riesgo y daños para las personas, máquinas o cualquier otro tipo de infraestructura que utilice el dique. Así pues, los métodos de predicción del rebase tendrán como objetivo final asegurar que el flujo de agua por encima del dique no supere los límites de tolerancia.

El rebase máximo que puede producirse representa uno de los eventos más peligrosos para los peatones y vehículos que se mueven por detrás del dique. Además, este rebase máximo puede ser el inicio de una avería de la estructura. Por lo tanto, es muy importante tener conocimiento de forma anticipada de estos eventos.

Para el caso del Puerto de Tarifa, el proveedor climático a partir de la cual se descargarán los datos de predicción para aplicarle las formulaciones anteriormente validadas es Puertos del Estado.



Los datos que aporta puertos del estado son los siguientes:

fecha	hora	t(sdn)	Hs	tp	tm	Dir_m
20180921	1	737324.042	0.77	7.4	4.44	85.19
20180921	2	737324.083	0.79	7.36	4.36	86.63
20180921	3	737324.125	0.81	3.38	4.26	88.75
20180921	4	737324.167	0.83	3.41	4.16	89.32
20180921	5	737324.208	0.85	3.42	4.09	89.04
20180921	6	737324.25	0.87	3.44	4.05	88.84
20180921	7	737324.292	0.86	3.42	4.04	89.66
20180921	8	737324.333	0.83	3.35	4.03	90.12
20180921	9	737324.375	0.8	3.28	4.02	90.08
20180921	10	737324.417	0.77	3.23	4.01	88.77
20180921	11	737324.458	0.75	3.17	3.98	88.19
20180921	12	737324.5	0.72	3.11	3.99	86.63

Tabla 25: Tabla ejemplo de los datos descargados de puertos del estado

En la tabla 25 se muestra un ejemplo de algunas horas de predicción de puertos del estado. Estos datos son aportados en el punto de predicción que se muestra en la figura 81 (Longitud 5.60 ° O, Latitud 35. 98° N)



Figura 79: Posición del punto de predicción

A estos datos de oleaje aportados por Puertos del Estado hay que incluir los datos también obtenidos de nivel del mar.

Puertos del Estado

- Altura de ola significativa (H_s)
- Periodo pico (T_p)
- Periodo medio (T_m)
- Dirección media (D_m)
- Nivel del mar

Puertos del Estado recoge la información de nivel del mar con referencia al cero REDMAR, con lo cual es necesario realizar una transformación ya que el nivel de referencia de la batimetría y de todo el proyecto es respecto a la BMVE. Para la conversión es necesario aplicar la regla que se detalla en el datum de puertos del estado en el punto de información del mareógrafo de Tarifa (figura 80).

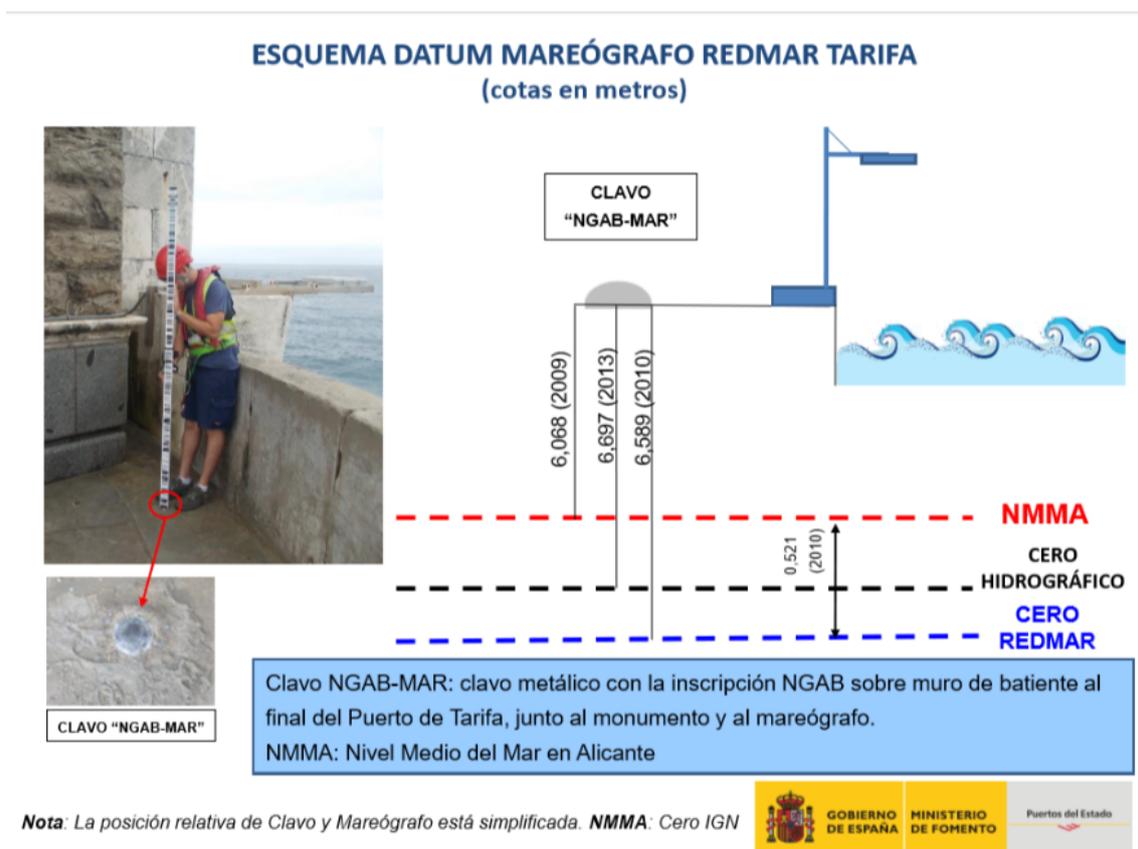


Figura 80: Datum del mareógrafo de Tarifa

Para convertirlo primero se suma la distancia desde el cero REDMAR hasta el clavo NGAB-MAR y obteniendo la distancia de este clavo hasta la BMVE (3.33 metros), se tiene referenciado el nivel de predicción en cuestión.

Estos datos obtenidos de las predicciones se propagan mediante la función de transferencia obtenida del estudio histórico (cuadro de interpolación producto del modelo SWAN) hasta los puntos de control a pie de ambos diques.

En el informe final del sistema operacional se incluye un gráfico comparativo de la variación de las predicciones, es decir, la predicción de la altura de ola predicha en la fecha anterior al día actual y la actual, de esta manera se puede cuantificar el error que se comete en la predicción anterior con respecto a la predicción actual. Este sistema predice las condiciones de oleaje cada 72 horas.

Una vez se tienen los datos propagados, se aplican las fórmulas modificadas de rebase las cuales quedaron validadas en el apartado 7. Las fórmulas que se utilizan para cada dique son:

Dique tramo I

- Caudal medio de rebase q (m^3/s)

$$\frac{q}{\sqrt{g} H_{mo}^3} = 0.09 \exp \left[\left(1.5 \frac{R_c}{H_{mo} \gamma_f \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right]$$

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0063 |\beta|$$

$$\gamma_f = a b \left(\frac{R_c D_n}{H_{mo}^2} \right)^{(b-1)} e^{\left(-a \left(\frac{R_c D_n}{H_{mo}^2} \right) \right)^b}$$

- Porcentaje de olas rebasadas

$$\frac{N_{ow}}{N_w} = 12,69 \left(\frac{R_c L_o}{H_{mo}^2} \right)^{-1.291}$$

Dique tramo VII

- Caudal medio de rebase q (m^3/s)

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{mo}^3}} = 0.167 \exp \left[- \left(2.087 \frac{R_c}{H_{mo}} \right) \right]$$

- Porcentaje de olas rebasadas

$$\frac{N_{ow}}{N_w} = 1.02 \exp \left[- \left(0.038 \frac{R_c L_o}{H_{mo}^2} \right) \right]$$

Una vez calculados los rebases, se genera un informe de la predicción de las variables del oleaje (H_s , T_p , T_m , D_m y nivel del mar) y además de la predicción de rebase (q (l/s) y número de olas rebasadas).

En el informe se detalla la explicación de las variables y además se incluye unas advertencias de rebase. Si el estado de mar de una hora concreta se supera el límite de rebase o se calculan olas que podrían llegar a dar eventos de rebase, la casilla de ese estado de mar se colorea en rojo. Esto sirve para alertar de forma visual a un usuario no experto.

Por último, este informe es enviado de forma automática por correo electrónico en el momento que estén disponibles las predicciones de Puertos del Estado para ser descargadas. El tiempo estimado de todo el proceso de predicción es de 10 minutos.

Se muestra en la siguiente página el código escrito en MATLAB para describir el proceso de predicción para demostrar que es completamente operativo.

```

%% FORECAST PUERTO DE TARIFA, predicción para tramo I y VII

%% Introducimos dos días anteriores de predicciones para disponer el gráfico de variación
de predicciones

lecturapde_a

%% Lectura de proveedores: tanto de oleaje como de nivel (ambos puertos del estado)

lecturapde

lecturepde_nivel

%% Variación de predicciones en base a los archivos cargados

incert2

%% Editamos el archivo para que tenga formato RBF

modifxcel
InterpolacionRBF

A=load('Tarifa_sin_viento_Num_Ptos_4_serie_Interpolada');

%% Cargamos los datos de la serie interpolada

Hs = A.TOT.Hs;
tm=A.TOT.Tm;
tp=A.TOT.Tp;
NM = A.TOT.NIVEL;
dir=A.TOT.DD;
FECHA=A.TOT.fecha;

Hs(:,3:4)=[];
tm(:,3:4)=[];
tp(:,3:4)=[];
dir(:,3:4)=[];

MES=FECHA(:,2);
DIA=FECHA(:,3);

%% Calibración de los datos de oleaje

[Hs1 Hs2] = calibración (Hs, dir);

Hs(:,1)=Hs1;
Hs(:,2)=Hs2;

%% Aplicación de las formulaciones modificadas

[q1, q2, Now1, Now2] =rebase (Hs, tm,tp,dir,NM, FECHA);

for i = 1: length(q1)
    if q1(i)>0.1
        q1(i)=q1(i);
    else
        q1(i)=0;
    end
end

for i = 1: length(q2)
    if q2(i)>0.1
        q2(i)=q2(i);
    else
        q2(i)=0;
    end
end

q = [q1(:) q2(:)];

Now = [Now1(:) Now2(:)];

```

```
%% Escribo en la plantilla
write_excel(Hs,dir,NM,q,Now,MES,DIA)

%% Paso de excel a pdf
disp('-----> Pasando de excel a pdf')

fff1=['C:\Users\fcort\Desktop\MASTERICP\TFM\FORECAST\'','informe_puerto_Tarifa.xlsx'];

[status, message] = xls2pdf (fff1,1,
['C:\Users\fcort\Desktop\MASTERICP\TFM\FORECAST\'','informe_puerto_Tarifa.pdf']);

%% Envio correo
disp('-----> Enviando correo')

email
```

Como se puede observar en el código MATLAB, el proceso incluye las siguientes funciones:

- lectura_pde_a: Lee las predicciones anteriores de oleaje del opendap puertos del estado para realizar un gráfico que se incluye en el informe de la comparación de las predicciones anteriores con la actual.
- lectura_pde: Lee la predicción actual de oleaje del opendap de puertos del estado, es decir, de la fecha en la que se consulta y las 72 horas siguientes.
- lecturapde_nivel: Lee la predicción actual de nivel del mar del opendap de puertos del estado, es decir, de la fecha en la que se consulta y las 72 horas siguientes.
- Incert2: realiza un gráfico comparativo de la variación de predicciones y los coloca en una posición en el informe.
- modifxcel: Recoge la información de oleaje y nivel y los transforma en formato excel que pueda ser leído por la siguiente función (RBF) y realizar la propagación de los datos
- InterpolacionRBF: Usa el archivo derivado de la función anterior en formato excel de las condiciones de oleaje y nivel del mar predichas y las propaga hacia pie de estructura de ambos tramos de dique mediante la función de transferencia heredada del análisis histórico.
- calibracion: calibra los datos propagados a pie de dique con los coeficientes direccionales obtenidos del análisis de oleaje del capítulo 5.
- rebase: función que aplica las ecuaciones validadas anteriormente en el capítulo 7 sobre los oleajes predichos, teniendo así el caudal medio de rebase y el número de olas rebasadas para cada estado de mar de la predicción.

- write_excel: escribe los datos de predicción en una matriz excel para su importación. Esta matriz está compuesta por las predicciones de: altura de ola significativa (H_s), periodo pico (T_p), dirección media del oleaje (Dir), caudal medio de rebase (q) y número de olas rebasadas (N_{ow}). Una vez escritos los datos sobre un informe tipo realizado previamente con excel, se exporta automáticamente a PDF.
- email: Una vez obtenido el PDF del informe, este se adjunta a un correo que se envía automáticamente a la dirección deseada.

A continuación, se adjunta un informe tipo de rebase resultado de la predicción del oleaje y rebase del día 21/09/2018 hasta el 23/09/2018.

INFORME DE PREVISIÓN DE REBASE PUERTO DE TARIFA (CÁDIZ)

Se presentan el calendario de la previsión de rebase en base a proveedores climáticos.

Se disponen 2 puntos de control necesarios para el estudio del dique 1 (Tramo I) y del dique 2 (Tramo VII).



La altura de ola incidente en el dique se encuentra ya calibrada con los datos instrumentales de la boya derivado del estudio de calibración realizado previamente.

Se incluye además un gráfico mostrando las variaciones de la altura de ola entre predicciones. La información que se da en los siguientes calendarios horarios es la siguiente:

Variables:

- Hs: Altura de ola significativa (metros)
- Dir Hs: Dirección pico del oleaje (grados)
- Nivel: Nivel del mar (marea astronómica + meteorológica) (metros)
- q: Caudal medio de rebase (l/s)
- Now: Número de olas esperadas que rebasen

La autoridad Portuaria de Tarifa recomienda el cierre del dique para realizar trabajos para el siguiente límite: $q_{lim} = 0.1 \text{ l/s}$

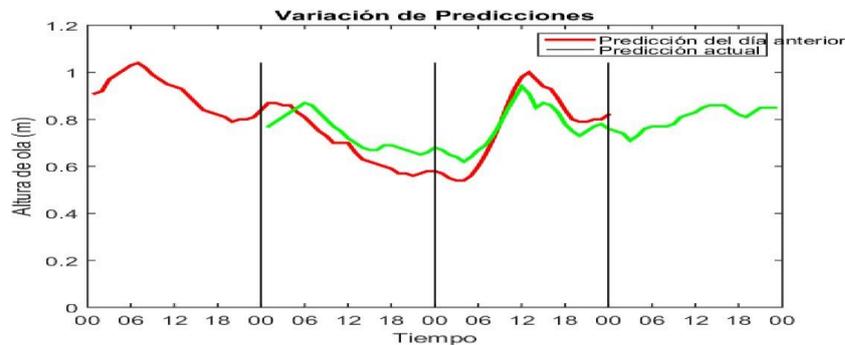


Figura 1: Variación de predicciones

PREDICCIÓN DE REBASE PUERTO DE TARIFA (CÁDIZ)												
Año 2018			Tramo I					Tramo VII				
Mes	Día	Hora	Hs	Dir Hs	Nivel	q	Now	Hs	Dir Hs	Nivel	q	Now
9	21	01	0.6	130.3	0.58	0	0	0.6	116.2	0.58	0	0
9	21	02	0.6	131.1	0.45	0	0	0.61	116.9	0.45	0	0
9	21	03	0.3	111.1	0.33	0	0	0.44	100.2	0.33	0	0
9	21	04	0.4	111.7	0.24	0	0	0.46	100.6	0.24	0	0
9	21	05	0.4	111.8	0.19	0	0	0.45	100.6	0.19	0	0
9	21	06	0.4	111.9	0.16	0	0	0.49	100.5	0.16	0	0
9	21	07	0.3	111.9	0.22	0	0	0.46	100.8	0.22	0	0
9	21	08	0.4	111.3	0.36	0	0	0.45	100.7	0.36	0	0
9	21	09	0.4	110.6	0.5	0	0	0.44	100.4	0.5	0	0
9	21	10	0.3	109.6	0.61	0	0	0.41	99.63	0.61	0	0
9	21	11	0.3	109	0.68	0	0	0.4	99.22	0.68	0	0
9	21	12	0.3	108.2	0.7	0	0	0.38	98.46	0.7	0	0
9	21	13	0.3	107.6	0.62	0	0	0.35	97.66	0.62	0	0
9	21	14	0.3	107	0.49	0	0	0.33	96.8	0.49	0	0
9	21	15	0.3	105.8	0.36	0	0	0.33	95.5	0.36	0	0
9	21	16	0.2	106.5	0.25	0	0	0.31	95.91	0.25	0	0
9	21	17	0.2	107.6	0.15	0	0	0.33	96.64	0.15	0	0
9	21	18	0.2	108.1	0.1	0	0	0.33	97.07	0.1	0	0
9	21	19	0.3	107.9	0.13	0	0	0.35	96.95	0.13	0	0
9	21	20	0.3	107.7	0.26	0	0	0.33	97.12	0.26	0	0
9	21	21	0.3	107.4	0.42	0	0	0.36	97.38	0.42	0	0
9	21	22	0.3	107	0.57	0	0	0.33	97.29	0.57	0	0
9	21	23	0.3	107.3	0.68	0	0	0.33	97.84	0.68	0	0
9	22	24	0.3	107.8	0.7	0	0	0.35	98.19	0.7	0	0

PREVISIÓN TRABAJOS OBRA DIQUE PUNTA DE LANGOSTEIRA												
Año 2018			Tramo I					Tramo VII				
Mes	Día	Hora	Hs	Dir Hs	Nivel	q	Now	Hs	Dir Hs	Nivel	q	Now
9	22	01	0.3	108.1	0.67	0	0	0.36	98.48	0.67	0	0
9	22	02	0.3	108.6	0.56	0	0	0.32	98.81	0.56	0	0
9	22	03	0.2	109.2	0.39	0	0	0.33	99.11	0.39	0	0
9	22	04	0.2	109.8	0.25	0	0	0.31	99.55	0.25	0	0
9	22	05	0.2	110.8	0.16	0	0	0.32	100.4	0.16	0	0
9	22	06	0.3	111.6	0.11	0	0	0.34	101	0.11	0	0
9	22	07	0.3	111.9	0.11	0	0	0.36	101.2	0.11	0	0
9	22	08	0.3	112	0.23	0	0	0.39	101.3	0.23	0	0
9	22	09	0.3	111.8	0.41	0	0	0.41	101.2	0.41	0	0
9	22	10	0.4	111.4	0.58	0	0	0.48	101	0.58	0	0
9	22	11	0.4	111.5	0.69	0	0	0.5	101	0.69	0	0
9	22	12	0.4	111.3	0.74	0	0	0.55	100.9	0.74	0	0
9	22	13	0.4	112.2	0.73	0	0	0.52	101.6	0.73	0	0
9	22	14	0.6	112.6	0.6	0	0	0.46	101.6	0.6	0	0
9	22	15	0.6	113.1	0.44	0	0	0.48	101.6	0.44	0	0
9	22	16	0.6	114	0.28	0	0	0.47	102	0.28	0	0
9	22	17	0.6	114.5	0.16	0	0	0.45	102.5	0.16	0	0
9	22	18	0.6	115.1	0.06	0	0	0.43	103.2	0.06	0	0
9	22	19	0.6	115.1	0.04	0	0	0.41	103.4	0.04	0	0
9	22	20	0.6	114.3	0.14	0	0	0.4	103.2	0.14	0	0
9	22	21	0.6	114	0.32	0	0	0.4	103.3	0.32	0	0
9	22	22	0.6	113.6	0.5	0	0	0.43	103.2	0.5	0	0
9	22	23	0.6	113.2	0.68	0	0	0.46	103.1	0.68	0	0
9	23	24	0.6	113	0.78	0	0	0.43	103	0.78	0	0

PREVISIÓN TRABAJOS OBRA DIQUE PUNTA DE LANGOSTEIRA												
Año 2018			Tramo I					Tramo VII				
Mes	Día	Hora	Hs	Dir Hs	Nivel	q	Now	Hs	Dir Hs	Nivel	q	Now
9	23	01	0.6	112.7	0.77	0	0	0.43	102.6	0.77	0	0
9	23	02	0.6	112.6	0.66	0	0	0.4	102.2	0.66	0	0
9	23	03	0.3	112.3	0.53	0	0	0.38	101.6	0.53	0	0
9	23	04	0.6	112.8	0.32	0	0	0.39	101.6	0.32	0	0
9	23	05	0.6	113.9	0.16	0	0	0.4	102.4	0.16	0	0
9	23	06	0.6	114.9	0.08	0	0	0.42	103.1	0.08	0	0
9	23	07	0.6	115.2	0.05	0	0	0.41	103.4	0.05	0	0
9	23	08	0.6	115.2	0.11	0	0	0.42	103.6	0.11	0	0
9	23	09	0.6	114.4	0.28	0	0	0.42	103.2	0.28	0	0
9	23	10	0.6	113.3	0.51	0	0	0.45	102.6	0.51	0	0
9	23	11	0.4	112.5	0.7	0	0	0.47	102.1	0.7	0	0
9	23	12	0.4	111.9	0.8	0	0	0.46	101.7	0.8	0	0
9	23	13	0.4	111.8	0.79	0	0	0.5	101.5	0.79	0	0
9	23	14	0.4	112.1	0.73	0	0	0.49	101.6	0.73	0	0
9	23	15	0.7	112.9	0.55	0	0	0.5	101.9	0.55	0	0
9	23	16	0.7	113.7	0.34	0	0	0.48	102.3	0.34	0	0
9	23	17	0.6	114.1	0.18	0	0	0.47	102.4	0.18	0	0
9	23	18	0.6	113.9	0.06	0	0	0.45	102.2	0.06	0	0
9	23	19	0.6	121.6	-0	0	0	0.42	107.7	-0	0	0
9	23	20	0.6	122.5	0.02	0	0	0.4	108.4	0.02	0	0
9	23	21	0.6	122.2	0.2	0	0	0.43	108.4	0.2	0	0
9	23	22	0.7	121.6	0.41	0	0	0.44	108.2	0.41	0	0
9	23	23	0.6	121	0.62	0	0	0.45	107.9	0.62	0	0

Capítulo 10. Conclusiones y líneas futuras de investigación

Una vez realizada la explicación del sistema operacional de rebase y tras la validación de las formulaciones particularizadas para el Puerto de Tarifa, las conclusiones de este estudio son:

- Un estudio de rebase para un puerto determinado necesita de un determinado estudio específico para determinar el comportamiento de las estructuras portuarias ante rebase, ya que las fórmulas de los manuales generales poseen bastante incertidumbre.
- La formulación propuesta describe de forma aceptable los eventos de rebase sobre los tramos I y VII del dique Sagrado Corazón, teniendo en cuenta la escasez de datos instrumentales que se contaba.
- Respecto al clima marítimo, se ha realizado una descripción correcta a través de las variables principales (Hs, Tp, Dm y nivel del mar) de la zona para un entendimiento de los procesos reinantes en Tarifa.
- En cuanto a la formulación de rebase, se ha observado mediante los ensayos acometidos que en este caso los oleajes que rebasan se concentran en unas direcciones muy concretas minimizándose así la importancia de un factor de oblicuidad porque los oleajes llegan de forma prácticamente perpendiculares, en un rango de +/- 10 grados.
- Se ha observado la importancia del nivel del mar en los eventos de rebase, ya que este disminuye el francobordo libre con lo cual se producen más eventos de rebase.
- El sistema operacional realizado con las formulaciones descritas es una herramienta de planificación y alerta para el Puerto.

Las futuras mejoras o líneas de investigación en relación con este estudio son las siguientes:

- Ampliar la serie de datos instrumentales de rebase sobre el dique Sagrado Corazón de Tarifa y todos los puertos, ya que esto permite una valiosa información para la validación de modelos y de formulaciones de rebase, run-up etc....
- Incluir el efecto del viento en el modelo IH2VOF. De esta forma este modelo tendrá en cuenta este efecto adverso sobre el rebase sobre cualquier estructura, ya que el viento puede ejercer un empuje sobre la masa de agua que queda en suspensión frente al dique.
- La realización de ensayos que demuestren la importancia del periodo en las formulaciones de rebase.
- En este estudio se han mantenido constantes los parámetros del dique a la hora de caracterizarlo para los ensayos cosa que se podría variar al realizar otros ensayos para poder obtener diferentes comportamientos de la estructura frente a los oleajes incidentes
- Realizar estudios para la obtención de nuevas formulaciones de rebase en modelos 3D aunque computacionalmente son muy costosos tienen en cuenta efectos de tridimensionalidad, es decir, tiene en cuenta los contornos portuarios que pueden llegar a ser importantes tal y como se ha demostrado en este estudio.
- Finalmente, el uso de este sistema de predicción frente a rebase puede permitir establecer planes de explotación a corto plazo y dar margen de tiempo para que los puertos puedan llegar a hacer actuaciones para mitigar o evitar catástrofes relacionados con mercancías, tráfico marítimo etc....

Capítulo 11. Referencias

Camus et al. - 2011 - *Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate*

Camus, Mendez, Medina - 2011 - *A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas*

Mínguez et al. - 2011 - *Directional Calibration of Wave Reanalysis Databases using Instrumental Data*

Losada - 2008 - *CE Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters*

Paula Camus, Fernando J. Mendez *, Raul Medina, Antonio Tomas, Cristina Izaguirre - *High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas*

SAFEPORT Puerto de Tarifa

Eurotop (2016) - *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*

Ministerio de Fomento. Puertos del Estado

Apuntes de la asignatura fundamentos para el diseño de obras marítimas. (Curso 2017-2018).

Apuntes de la asignatura clima portuario. (Curso 2017-2018).